SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS

SCIENCES ET AVENIR

OCÉAN

Le plus grand espoir de la planète

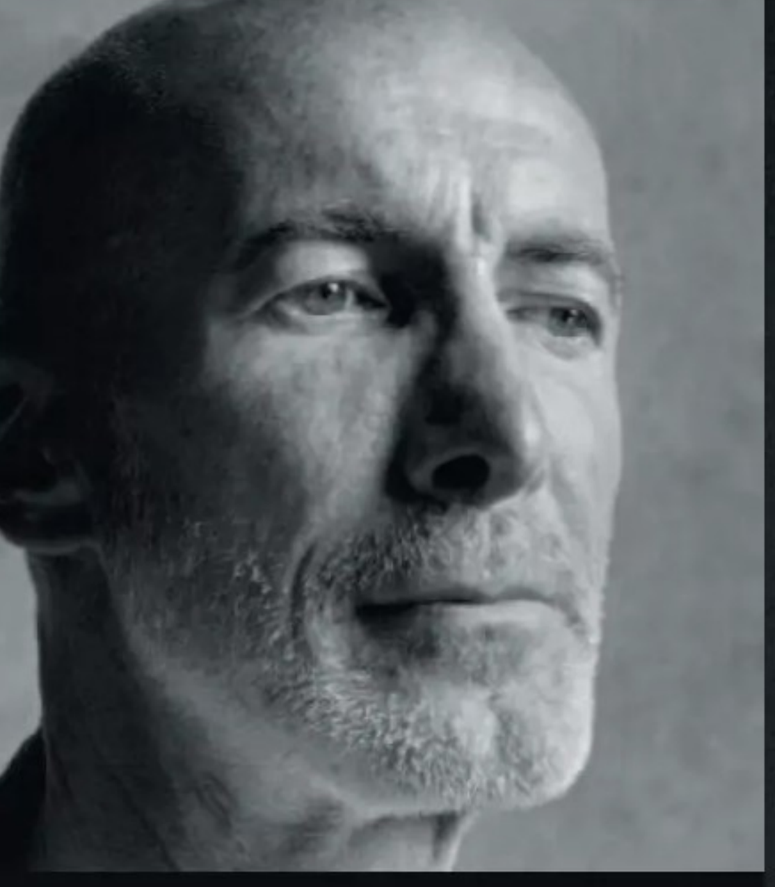
Avec

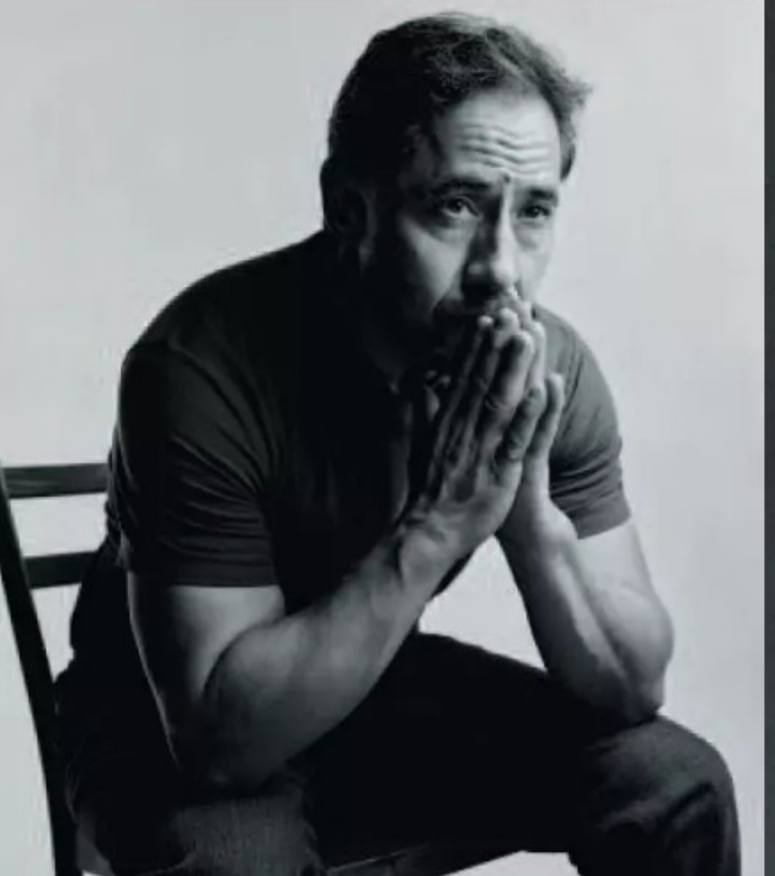
NUMÉRO SPÉCIAL 222 JUILLET/SEPTEMBRE 2025 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 SCAD
BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 SCAD

FRANCOBANFI/NATUREPL/E.BACCEGA

L 13667 - 222 H - F: 5,90 € - RD

GSK





**“Le zona ?
Je ne suis pas sortie
de chez moi pendant des jours.
Je ne pensais pas qu’en étant
en bonne santé je pouvais
le développer.” ***

Plus de 90 % des 65 ans et plus sont déjà porteurs du virus responsable du zona.**

Parlez-en à votre médecin ou votre pharmacien dès aujourd’hui.

Plus d’informations sur
demain-sante.fr

*Comédiens relatant des témoignages de patients.

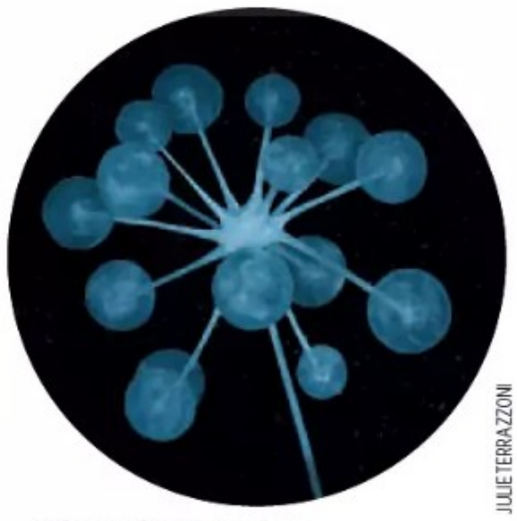
**Les personnes porteuses du virus ne développeront pas toutes un zona.

NP-FR-HZU-ADVR-240002-V3 - Février 2025 © 2025 Groupe GSK ou ses concédants.

Sommaire

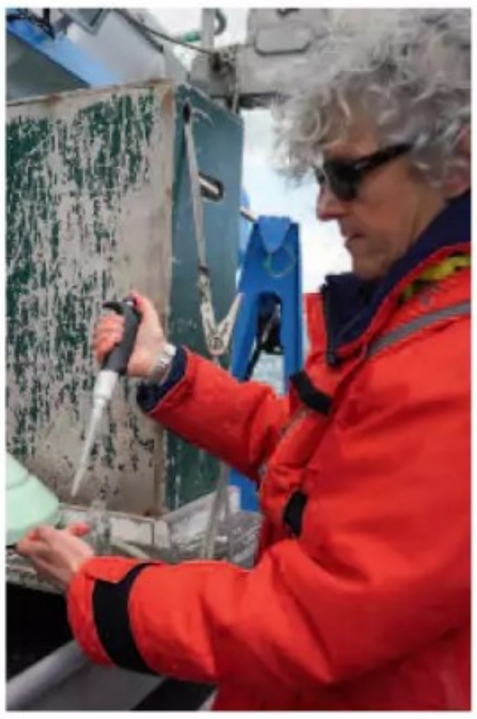
MONTEREY BAY AQUARIUM

Jeux de lumière en eaux profondes P. 62



JULIE TERRAZZONI

Plongée dans les ténèbres P. 68



BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

À Roscoff, cap sur l'infiniment petit P. 38

CORINNE ROZOTTE/DIVERGENCE

Le littoral à la merci des eaux P. 46

LORRAINE TURCI/HANS LUCAS/GREENPEACE

Des aires marines protégées… mais pas assez P. 50

5 **Édito**

6 **RENCONTRE**
Françoise Gaill
« Le dernier espace naturel, à protéger de toute urgence »

10 **REPÈRES**

14 **À L'UNOC, DES AVANCÉES EN TROMPE-L'ŒIL**

15 Pour les ONG, le compte n'y est pas

17 Avant la politique, la science

18 **INTERVIEW Olivier Poivre d'Arvor**
« L'océan est sous pression, mais il n'est pas à l'agonie »

20 **EN BREF**

24 **UN MILIEU À PRÉSERVER**

26 Le grand régulateur du climat

32 Le feu couve dans les forêts animales

36 La Méditerranée, future mer tropicale

38 À Roscoff, cap sur l'infiniment petit

44 **DU LITTORAL À LA HAUTE MER**

46 Le littoral à la merci des eaux

50 Des aires marines protégées… mais pas assez

54 Microplastiques, mégapollution

57 **INTERVIEW Daniel Pauly**
« Face aux lobbies de la pêche, il est urgent que les États interviennent »

58 Dulse, laitue de mer ou laminaires… des algues à tout faire

60 **EXPLORER LES ABYSSES**

62 Jeux de lumière en eaux profondes

68 **PORTFOLIO**
Plongée dans les ténèbres

74 Le plancher océanique révèle ses secrets de fabrication

76 Au fond des mers, des nodules qui valent de l'or

80 La chasse aux trésors sous-marins, une affaire d'État

82 **INTERVIEW Paul Watson**
« L'écologie consiste à protéger l'humanité de sa propre folie »

SCIENCES ET AVENIR & La Recherche

présentent

72H POUR DÉCOUVRIR L'EXTRAORDINAIRE RICHESSE DES ABYSSES.

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

4ème ÉDITION

26 - 27 SEPT. 2025
LA CITÉ DE LA MER
CHERBOURG-EN-COTENTIN

24 - 27 SEPT. 2025
EN PLEIN AIR
SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

- ET EN DIGITAL -

Conférences et débats portés par les plus grands spécialistes, animations...
Nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Grand Océan s'inscrit dans le cadre de la Conférence Océan des Nations-Unies (Nice 2025).

Photo : © P.G - stock.adobe.com - Conception : MEDIAOBS LE STUDIO

Partenaires officiels

Partenaires Associés

Partenaires

Partenaires médias

Organisé par

LES DOSSIERS
SCIENCES ET AVENIR

NUMÉRO SPÉCIAL
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
redaction@sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir
Mathieu NOWAK 56.38
Rédacteur en chef La Recherche
Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR 56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48

Collaboratrice Sylvie ROUAT
Ont collaboré à ce numéro :
Grégoire ADER, Bruno BOURGEOIS,
Laureen BOUYSSOU, Riva BRINET-SPIESSER,
Loïc CHAUVEAU, Denis DELBECQ,
Caroline DEPECKER, Nicolas GUTIERREZ C.,
Marika JULIEN, Valérie HANDWEILER,
Sylvie NADIN, Marie PARRA, Éliane PATRIARCA,
William ROWE-PIRRA, Vahé TER MINASSIAN,
Julie TERRAZZONI, Marie-Laure THÉODULE,
Agnès VERNET

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires
75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @
mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES
01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication
Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service Abonnement
45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly Cedex.
Tél. : 01.55.56.71.48.
Tarif des abonnements : France,
1 an simple (12 numéros) : 35 €.
1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €.
Tarifs pour les pays étrangers sur demande.

Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.

Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
ISSN 2970-7420 Distribué par MLP.

PEFC 10-31-1557 Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France Impression, certifié PEFC

ACPM DIFFUSION

Édito

SHANE GROSS/NATUREPL.FR

De Nice... aux abysses

La Terre. Drôle de nom pour une planète couverte d'eau à 71 %. C'est que l'espèce humaine a mis du temps à s'en apercevoir. Comme elle en a mis à y regarder de plus près. L'océan n'a longtemps été qu'une marge sauvage, un horizon inquiétant. Une immensité aux ressources infinies, présente de toute éternité et prodigue à jamais, et dont on ne savait, au fond, pas grand-chose. Une *mare nullius* dans laquelle on a fini par s'arroger le droit de faire à peu près n'importe quoi. Tout juste s'émouvait-on d'une marée noire ou du sort des bébés phoques.

On ne peut plus en dire autant. En quelques décennies, la science a déployé ses instruments dans ce vaste terrain de jeu. Repérant, au plus obscur des abysses, une vie aussi foisonnante qu'insoupçonnée. Découvrant les mécanismes physico-chimiques qui font de cette masse d'eau le grand régulateur du climat. L'auscultant en permanence au moyen de bouées bardées de capteurs, de bathyscaphes équipés de caméras, de stations sous-marines posées sur le plancher océanique par plus de 1 500 mètres... Prenant son pouls, en quelque sorte. Dans ce domaine, la France dispose des meilleurs spécialistes et d'une flotte océanographique parmi les plus performantes au monde. Une voix qu'on écoute. Que dit-elle ? À l'unisson des scientifiques : que le grand bleu est mal en point.

À Nice, en juin dernier, la communauté internationale s'est donc réunie à son chevet. Ministres, chefs d'État, déclarations, points presse. Cette troisième Conférence des Nations unies sur l'océan a été précédée – et c'est une première – par un congrès réunissant près de 2 000 chercheurs. Avec l'ambition de fournir aux gouvernants des données robustes sur lesquelles fonder leurs décisions. À l'heure où l'environnement disparaît dangereusement des agendas gouvernementaux, où ses défenseurs sont présentés comme des empêcheurs de produire en rond, et où, de l'autre côté de l'Atlantique, un Président encourage l'exploitation minière des grands fonds au mépris du droit international, espérons que ce sommet azuréen soit suivi d'effets. Et vite ! Parions sur la volonté des décideurs pour que des expressions comme « usage durable » ou « croissance bleue », nouveaux mantras, entravent réellement la course à l'accaparement des richesses de la mer, dernière frontière de politiques économiques aveugles. Il en va de la santé de ce bien commun comme de la nôtre.

Mieux comprendre l'océan permettra certainement de mieux le protéger. Pour autant, apprécions l'inaccessible. Plongeons dans les abysses et admirons les créatures fantastiques qui s'y épanouissent. Bioluminescentes, élégantes ou effrayantes, elles sont minutieusement dessinées dans ces pages par l'illustratrice naturaliste Julie Terrazzoni. Un spectacle émouvant !

La magie des abysses se poursuivra du 26 au 28 septembre à Cherbourg, à l'occasion de l'événement Grand Océan dont *Sciences et Avenir* est partenaire pour la quatrième année consécutive. Un rendez-vous à ne pas manquer. D'ici là, nous vous souhaitons à tous, en bord de mer comme ailleurs, un bel été.

VINCENT REA

Rencontre

FRANÇOISE GAILL

Biologiste, océanographe et vice-présidente de la plateforme internationale Océan et Climat

« C'est le dernier espace naturel, à protéger de toute urgence »

Si l'océan s'impose aujourd'hui dans les discussions internationales, c'est grâce au travail inlassable des scientifiques qui permet d'en préciser la richesse, la fragilité et le rôle, crucial pour la planète, salue l'océanographe. Il est grand temps d'agir pour le préserver!

Comment vous êtes-vous engagée pour l'océan?
Au départ, j'étais spécialiste de biologie marine, mais c'est assez tard dans ma carrière, lorsque j'ai découvert les sources hydrothermales – ces geysers d'eau chaude qui jaillissent au niveau des dorsales océaniques à près de 2 000 mètres de profondeur –, que j'ai vraiment souhaité m'engager dans ce type de recherche. J'ai fait partie des premiers chercheurs à constater que, contre toute attente, il existait là des oasis de vie, en l'absence de lumière. J'ai eu conscience que l'océan était le dernier espace naturel, et qu'il fallait vraiment qu'on s'en occupe, comme le faisaient déjà les Américains. Mais en France comme en Europe, la recherche sur l'océan n'était jamais la priorité…

Quand les choses ont-elles changé?
Le point de bascule, ç'a été le Grenelle de la mer, en 2009. C'est là qu'en France s'est constituée pour la première fois une « communauté océan ». Jusque-là, on avait d'un côté les scientifiques, d'un autre les pêcheurs, d'un autre encore les « voileux »… Puis, en 2015, il y a eu la COP21. À cette occasion, avec quelques associations et instituts de recherche, nous avons créé la plateforme Océan et Climat, lancée à l'Unesco. Car auparavant, on ne parlait pas d'océan dans les COP, et beaucoup plus des forêts! Pourtant, l'océan est plus important pour le climat, tant du point de vue de la régulation des phénomènes climatiques que de l'absorption de la chaleur émise par les activités anthropiques. C'est alors, dans le préambule de l'Accord de Paris, que le mot « océan » a été introduit au niveau des Nations unies. C'était une grande victoire! Au même moment, l'ONU a publié les objectifs de développement durable pour 2030, dont le quatorzième était « Conserver et exploiter de manière durable les océans et les mers ». Et puis l'Unesco a publié le World Ocean Assessment, premier état de l'océan au niveau mondial. Après, tout est allé crescendo.

Vous venez de présenter lors de l'Unoc, la conférence onusienne sur l'océan qui s'est tenue en juin à Nice, l'un de vos projets: l'Ipos, la Plateforme internationale pour la durabilité de l'océan. Qu'est-ce exactement?
Au départ, j'avais en tête une sorte de « Giec de l'océan ». Mais l'idée était vraiment trop mégalo! L'Ipos a été conçue conjointement par l'Europe, dont je suis la représentante, et le Sud, représenté par Tanya Brodie-Rudolph, juriste d'Afrique du Sud, avec l'appui d'institutions scientifiques comme le CNRS, Sorbonne Université, l'IRD, l'Ifremer ou le Muséum national d'histoire naturelle. Notre mission est de mettre à disposition de tous les États des moyens de connaissance leur permettant d'agir. Aujourd'hui, de nombreuses conventions régissent les différents

> **« Du point de vue de la régulation du climat et de l'absorption de la chaleur due aux activités anthropiques, l'océan est plus important que les forêts**

FRANÇOISE GAILL

Directrice de recherche émérite au CNRS, elle est spécialiste des écosystèmes profonds et de l'adaptation aux environnements extrêmes. Elle a participé à de très nombreuses campagnes océanographiques françaises et internationales. De 2008 à 2013, elle a dirigé l'institut Écologie et Environnement du CNRS. Surnommée la « voix de l'océan », elle cofonde en 2013 la plateforme internationale Océan et Climat, dont elle est vice-présidente. Et crée en 2023 l'International Panel for Ocean Sustainability (Ipos) officiellement lancé à l'occasion de la Conférence des Nations Unies sur l'Océan, à Nice, en juin dernier.

aspects de l'océan – le transport maritime, objet de plusieurs accords internationaux; les zones économiques exclusives, qui sont du ressort des États eux-mêmes; le fond de l'océan, qui relève de l'Autorité internationale des fonds marins. Sans compter les organisations régionales des pêches. Les États ont un travail fou à faire! Or, si l'on veut qu'ils s'engagent, il faut qu'ils sachent par quoi commencer. Les petits États – insulaires en particulier – n'ont ni l'infrastructure nécessaire, ni les moyens humains, ni l'accès aux données, qui coûtent très cher.

Concrètement, comment agissez-vous?

En réponse à la demande d'un État, l'Ipos fournit des connaissances scientifiques, tout en essayant de valoriser les savoir-faire techniques locaux, afin de proposer des solutions rapidement – en moins de deux mois. Nous avons développé un outil d'intelligence artificielle, Ipos Ocean GPT, qui comporte à peu près 800 000 données et donne l'état des lieux pour une région donnée. Sur cette base, nous travaillons avec des experts. En ce moment, par exemple, nous collaborons avec les Seychelles, le Panama et Madagascar.

Les priorités locales et globales ne sont pas les mêmes?

Exactement, et c'est un travail de titan. Il y a les grands principes généraux émis par le Giec, la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité (IPBES), etc. Mais passer à l'acte est une autre paire de manches! Pour ne prendre que l'Europe, l'élévation du niveau de la mer dans la Baltique n'a rien à voir avec celle de la Bretagne ou de la Méditerranée. C'est pourquoi l'Ipos voudrait s'appuyer sur des organisations régionales. ◆◆◆

◆◆◆ L'Unoc a-t-elle été un moment important ?
Pour commencer, c'est la première fois qu'était organisé un grand forum scientifique dans une structure onusienne. Ensuite, l'Ipos a été annoncée formellement. Et troisième chose, ce sommet a rappelé que l'océan, ce dernier espace naturel, est aussi important que les autres. Et qu'il est paradigmatique par rapport à l'ensemble des pressions qui pèsent sur la Terre : le climat, l'érosion de la biodiversité... Au cœur des discussions, la question était : « Quels usages va-t-on faire de l'océan ? » On a encore la possibilité d'agir. Alors allons-y !

Et pour la recherche ?
Ce qui se passe aux États-Unis est très dommageable : il va sans doute y avoir une rétraction des investissements, avec des conséquences gravissimes pour l'acquisition et le partage international de données. La Chine va peut-être en partie compenser ce manque, l'Europe aussi... Lors du sommet Choose Europe for Science, à Paris en mai dernier, la recherche fondamentale a été affirmée pour la première fois comme une valeur européenne par la voix d'Ursula von der Leyen, présidente de la Commission européenne.

> **« Les questions les plus urgentes ? L'exploitation minière des grands fonds et l'élévation du niveau de la mer**

La France est plutôt bien placée, d'ailleurs, dans la recherche océanographique.
Si l'on regarde sa position en termes de classement académique, elle est troisième au monde. C'est quand même génial ! En physique, en chimie, en biologie, en microbiologie, en écologie, on est les meilleurs ! Enfin, disons qu'on est très bons... Mais cette excellence scientifique n'est pas vraiment valorisée.

Quel est le plus important à savoir sur l'océan ?
Son histoire. C'est quand même surprenant : c'est lui qui a donné naissance à la vie sur Terre ! Nous venons de l'océan... Deuxième point : c'est un espace fluide, dont on n'a pas encore compris comment il se meut dans toutes ses parties. Par exemple, il absorbe plus de 90 % de l'énergie thermique, mais on ne sait pas comment cette énergie se distribue au sein même de l'océan, ni comment elle intervient.

On n'en sait donc pas encore assez ?
Non. Ce qu'on commence à bien connaître, c'est l'élévation du niveau de la mer. Mais la modélisation de la circulation océanique profonde est un grand enjeu, ainsi que les problèmes de salinité. La fonte des glaces va sans doute entraîner des conséquences beaucoup plus graves que prévu sur la faune, mais aussi sur tout ce qui concerne la dynamique de circulation, l'oxygénation et le CO_2. Les climatologues ont encore beaucoup à faire, notamment pour calibrer les différents paramètres et les modéliser. Et puis, il faut aussi savoir travailler à petite échelle, celle du vivant. Pour l'instant, on n'a pas encore complètement fait le lien entre les échelles globale et locale. Après, il faudra encore faire la connexion avec les socio-écosystèmes...

2025 est l'année de la mer, et de nombreux événements se succèdent, notamment le sommet Grand Océan, à Cherbourg, du 26 au 28 septembre, centré sur les abysses. Quels sont les programmes de recherche les plus excitants en ce domaine ?
Selon moi, ce sont toutes les recherches sur les ressources génétiques que recèlent les organismes marins. La fondation Tara Océan a attiré l'attention sur ce sujet, qui avait déjà été abordé à un niveau plus confidentiel par la Station biologique de Roscoff, en ce qui concerne les algues. Il y a là la possibilité, à travers l'ADN environnemental, non seulement de savoir rapidement quels organismes sont présents, mais aussi d'observer comment les différents types d'organismes vivants s'associent, comment ces communautés évoluent en fonction des pressions... Et puis, il y a un gisement de découvertes incroyable dans l'utilisation de la connaissance génomique pour la santé, l'agroalimentaire, les matériaux...

Vous avez un exemple ?
J'ai travaillé sur les vers de Pompéi (*Alvinella pompejana*), des vers extrêmophiles qui vivent autour des sources hydrothermales. Une de mes collaboratrices, Aurélie Tasiemski, a identifié une molécule antimicrobienne dans une chevelure que l'animal porte dans son dos, faite de micro-organismes. Aujourd'hui, l'« alvinellacine » est testée à l'Institut Pasteur en tant qu'antibiotique contre des maladies pulmonaires.
En revanche, l'un des grands dangers, c'est le CDR, le *carbon dioxide removal*, les techniques visant à extraire le CO_2 de l'atmosphère. Pour moi, c'est de la géo-ingénierie. C'est comme racler le fond des mers. Je suis très méfiante à l'égard des apprentis sorciers.

L'océan est donc une source d'espoirs, mais on en rappelle surtout aujourd'hui les problèmes... Certains chercheurs affirment par exemple qu'il n'y aura plus de poissons en 2050...
Je suis d'accord. Vraiment. À la différence près que l'Europe, par la politique de pêche qui a été menée,

a réussi à montrer qu'il est possible de réguler l'accès au poisson, en ce qui concerne le thon rouge par exemple.

Il faut donc de l'optimisme…

Et surtout de l'organisation ! C'est ce que nous faisons en Europe. Mais nous ne sommes pas seuls. La force est aussi avec les petits États insulaires, qui n'ont pas la possibilité de se réfugier dans les montagnes…

Mais certains d'entre eux acceptent la perspective d'exploiter les grands fonds, notamment pour recueillir les nodules polymétalliques qui contiennent des métaux rares…

En effet, cela apparaît comme un droit au développement. Ce qui se conçoit très bien. Cependant, certains se sont organisés pour élaborer une méthodologie, une charte, afin de rendre possible une exploitation dans des conditions – je dirais, pour nous scientifiques – recevables, en ayant conscience des impacts potentiels. Des navires d'exploration de sociétés privées américaines sont utilisés pour cartographier – gratuitement ou presque, comme c'est le cas au Costa Rica – des fonds marins potentiellement exploitables. C'est à bénéfice réciproque : les entreprises expérimentent leurs outils, et les scientifiques sont ravis de pouvoir, pour la première fois, avoir accès à toute la biodiversité marine de leur pays.

Quelle est la première urgence pour l'océan ?

Un moratoire sur l'exploitation minière des grands fonds, même si Donald Trump a signé un décret l'autorisant. Et puis, les problèmes d'élévation du niveau de la mer et la redistribution des activités au bord de l'océan, le tourisme, etc. Il faut prévenir et adapter. Une coalition des villes côtières a d'ailleurs été lancée lors de l'Unoc. Autre sujet, les aires marines protégées, les AMP… qui doivent l'être vraiment, avec notamment un plan de financement. Il me semble qu'il y a une évolution chez les artisans pêcheurs sur le sujet : ils commencent – la jeune génération – à reconnaître que s'il y a une AMP, la pêche peut être plus intéressante autour. Prenons l'exemple de la coquille Saint-Jacques. Voilà une réussite remarquable au niveau mondial. Obtenue en toute intelligence avec l'ensemble des parties. C'est donc possible !

> **« Ce qui se passe aux États-Unis aura des conséquences graves pour l'acquisition et le partage international des données**

Qu'est-ce qui a changé dans l'appréhension de ce milieu depuis le début de votre carrière ?

Il n'y a pas eu de grande évolution : on conserve le couple formé par la séduction du littoral d'une part, et l'effroi de la haute mer d'autre part. Ma génération a eu Cousteau et, en tant qu'enfant, c'était magnifique ! C'est ce que reprennent un peu aujourd'hui les expéditions scientifiques menées par la Fondation Tara avec sa goélette. Et on a peut-être de plus en plus conscience que l'eau est remplie de bestioles, alors qu'auparavant, on la voyait plutôt comme cristalline.

Y a-t-il des espèces qui vous fascinent particulièrement ?

C'est d'abord la beauté qui me fascine. Vous pouvez avoir des espèces minuscules, ou même des mollusques, qui vivent à plusieurs milliers de mètres de fond et qui envoient des larves jusqu'à la surface. Et puis celles-ci redescendent… Leur cycle de vie est celui de l'océan. C'est une occupation de l'espace incroyable par rapport à nous, les humains. En comparaison, nous sommes relativement casaniers ! Et puis vous avez les baleines, mastodontes magnifiques. Cette amplitude, cette plénitude de l'animal dans l'océan, c'est formidable.

Peut-on encore rêver devant l'océan ?

Oui ! L'océan est encore un espace de rêve. Mais il faut aussi le connaître. Il ne faut surtout pas s'arrêter au bord de l'eau, mais y aller !

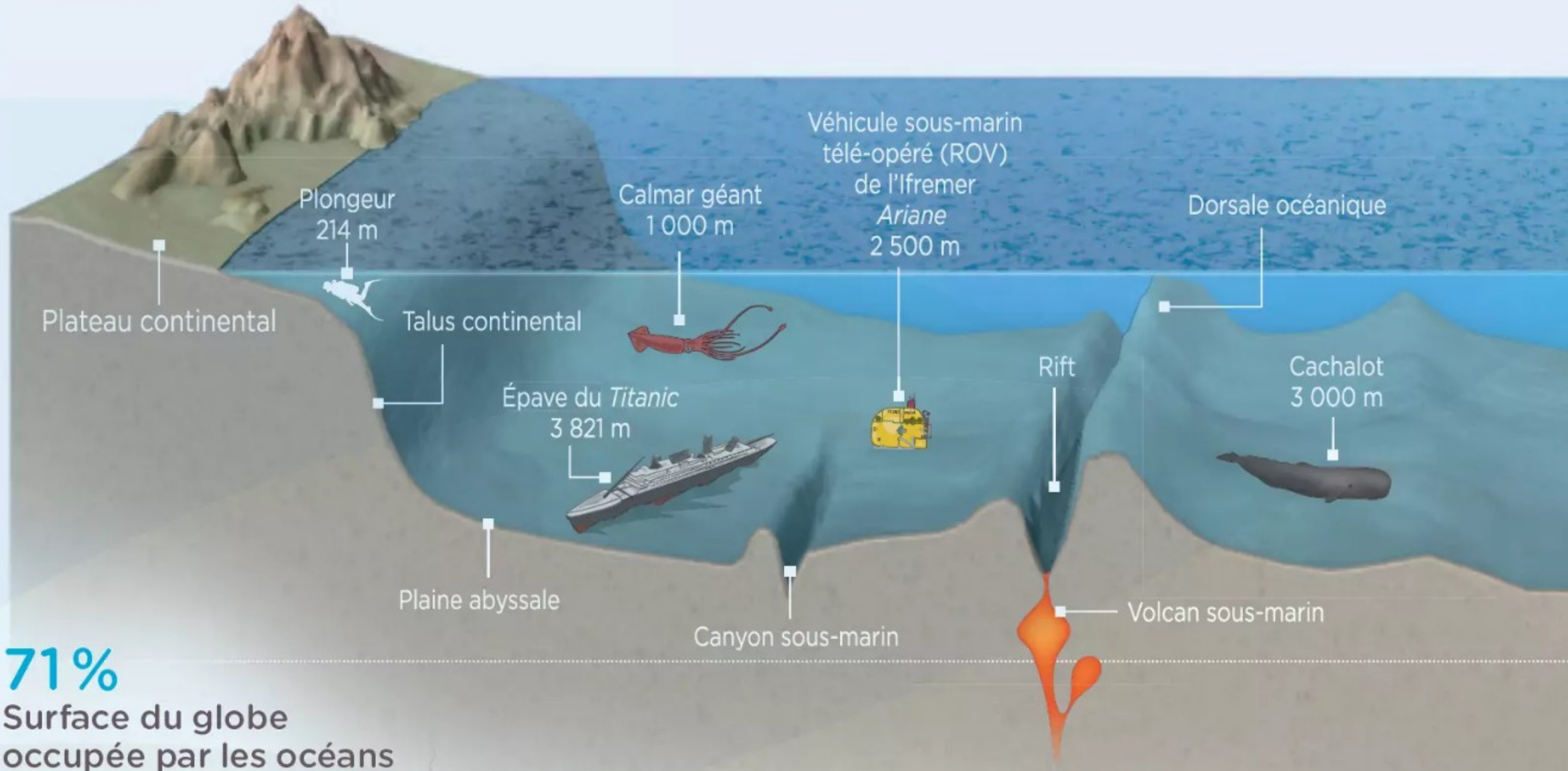
PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA

PHOTOS : SERGE PICARD POUR SCIENCES ET AVENIR

À la découverte des vastes profondeurs marines

Des premiers scaphandriers aux chercheurs d'aujourd'hui avec leurs véhicules ultra-perfectionnés, l'humain n'a cessé de se mettre à l'eau pour percer les mystères du grand bleu.

PAGES RÉALISÉES PAR VINCENT REA • ILLUSTRATIONS : BRUNO BOURGEOIS



71%
Surface du globe occupée par les océans
(61% de l'hémisphère nord et 81% de l'hémisphère sud)

3682 mètres
Profondeur moyenne
(altitude moyenne des continents : 840 mètres)

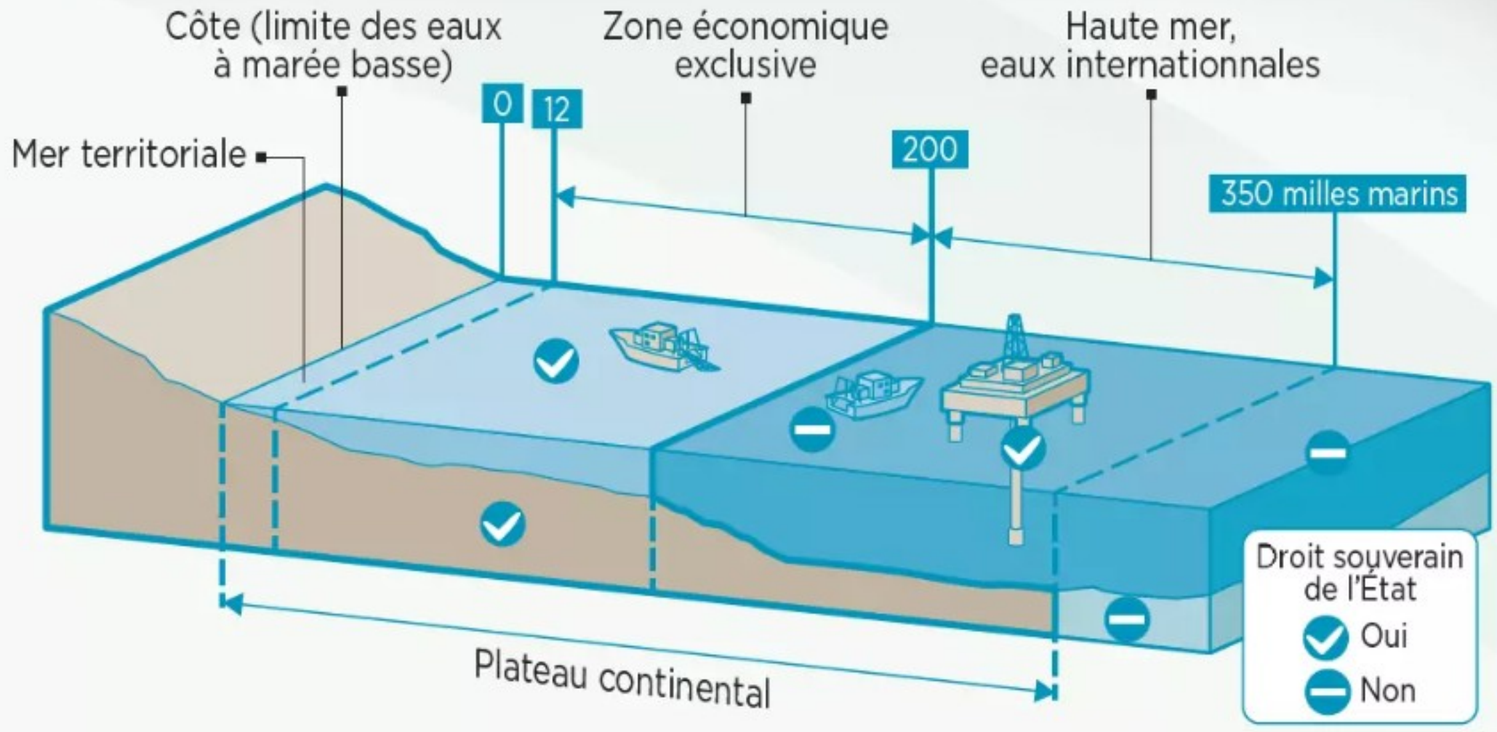
10 983 mètres
Profondeur maximale
(dans la fosse des Mariannes, au point appelé Challenger Deep)

1370 millions de kilomètres cubes
Volume d'eau estimé

3,7 °C
Température moyenne

35 g/litre
Taux moyen de salinité

À qui appartient l'océan ?

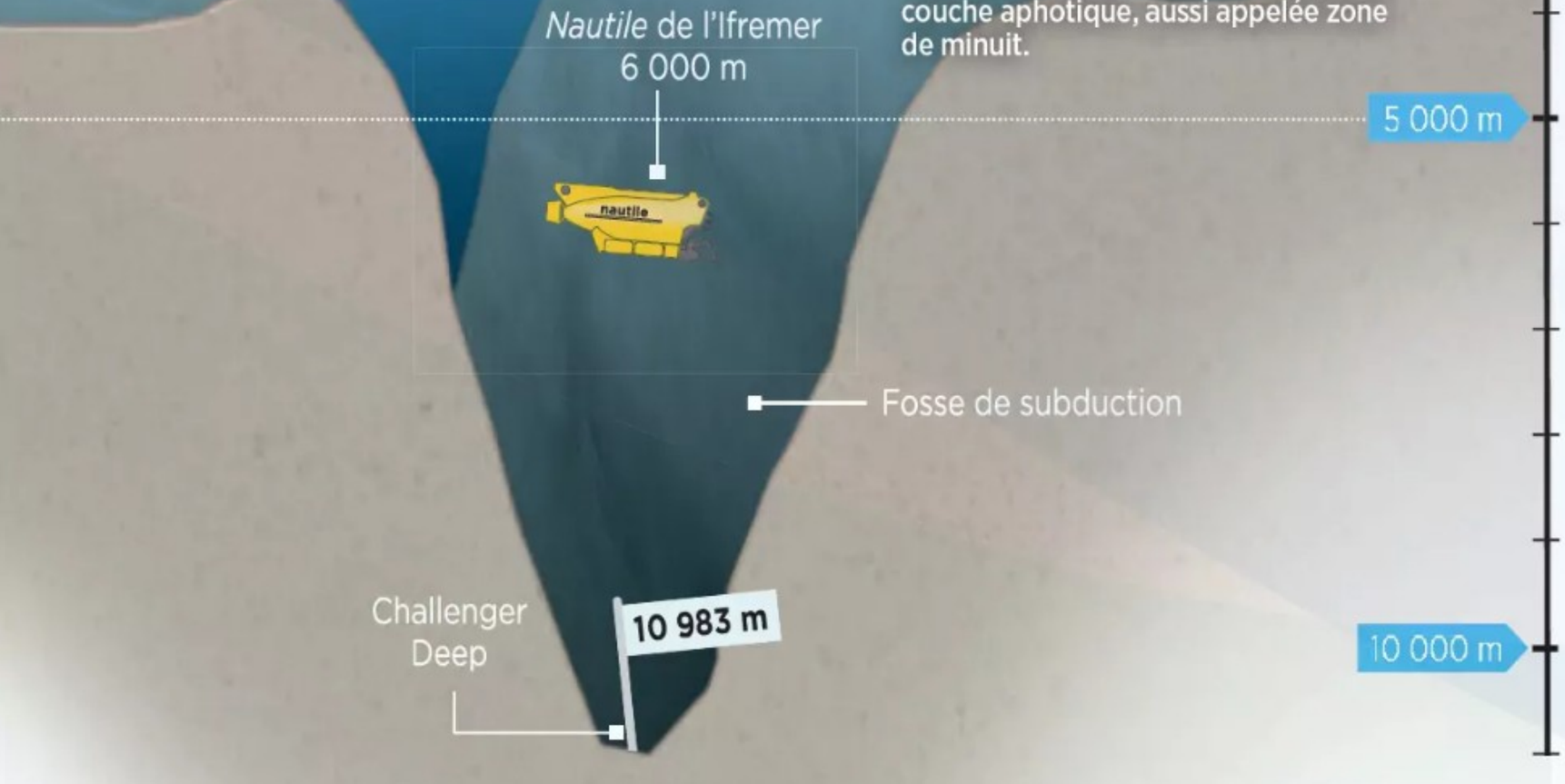


La zone économique exclusive (ZEE) donne au pays riverain des droits exclusifs d'exploitation, de préservation et de gestion des ressources. Si le plateau continental s'étend au-delà, et dans la limite de 350 milles, les droits d'exploitation sont maintenus sur les fonds marins et leur sous-sol.

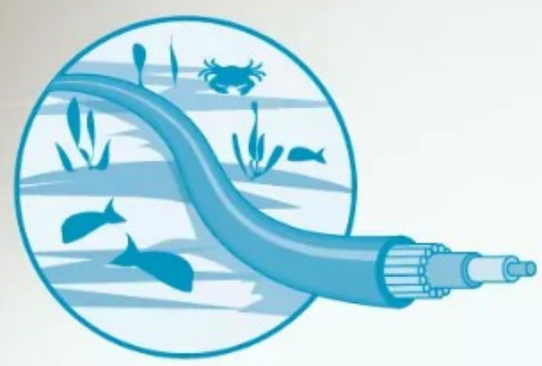
Cyrille P. Coutansais et Guillemette Crozet, *La Mer, une infographie*, Cnrs Éditions, 2023

26 % des fonds marins ont été cartographiés, principalement à l'aide de sonars multifaisceaux. **Moins de 0,001%** ont été observés par des humains.

La lumière du soleil éclaire la couche euphotique (du grec *phos*, lumière, et *eu*, bon), dont la profondeur varie selon la latitude et la turbidité. Elle parvient jusqu'à la couche oligophotique (grec *oligo*, peu), ou zone crépusculaire, en quantité insuffisante pour permettre la photosynthèse, mais n'atteint pas la couche aphotique, aussi appelée zone de minuit.



3 millions d'épaves gisent au fond des mers, dont **75 %** dateraient de la Deuxième Guerre mondiale.



559 câbles de télécommunication traversent mers et océans, soit près de 1,5 million de kilomètres linéaires, assurant **99% du trafic internet mondial**. Posé en 2022 au départ de Marseille, le plus long mesure **45 000 kilomètres** et connecte 33 pays d'Europe, d'Afrique et d'Asie.

Deux siècles d'exploration

1844 Première plongée scientifique. En Sicile, le zoologiste français Henri Milne-Edwards descend en scaphandre à une profondeur de 8 mètres.

1873-1876 Première campagne océanographique mondiale (HMS Challenger).

1893 Premières photos sous-marines par le biologiste français Louis Boutan.

1934 Dans leur bathysphère descendu par un câble, les Américains Otis Barton et William Beebe atteignent la **profondeur record de 908 mètres** au large des Bermudes.

1941 Premier scaphandre autonome par Jacques-Yves Cousteau et Émile Gagnan.

1959 Première carte topographique des fonds marins réalisée par les géologues américains Marie Tharp et Bruce Heezen.

1960 À bord du **bathyscaphe Trieste,** Jacques Piccard et Don Walsh se posent à 10 916 mètres, dans la fosse des Mariannes.

1966 Première mesure de l'expansion continue des fonds océaniques.

1977 Découverte des cheminées hydrothermales, à 2500 mètres de profondeur, au large des Galápagos.

1984 L'Ifremer lance le *Nautile*, sous-marin habité pourvu de deux bras contrôlés par le pilote et de caméras. En 1987, il participera au repérage du *Titanic*.

2010 Une station d'observation sous-marine européenne est installée sur la dorsale nord-atlantique, à 1700 mètres de profondeur, pour étudier le volcan Lucky Strike et ses sources hydrothermales.

2019 L'Américain Victor Vescovo atteint la **profondeur record de 10 928 mètres.**

2020 L'ex-astronaute américaine **Kathleen Sullivan** est la première femme à atteindre Challenger Deep, le point le plus profond de la fosse des Mariannes.

Sources : Ifremer, Giec, Copernicus Marine Service, Plateforme Océan & Climat, World Register of Marine Species, Unesco, Cnuced, FranceAgriMer, Agreste, Telegeography

Un bien commun sous pression

L'océan ne manque pas de ressources. Mais le réchauffement global, la surpêche et les pollutions diverses mettent en péril l'équilibre de ce système vital pour la planète. À protéger d'urgence !

L'océan est à l'origine de **50 % de notre oxygène**.

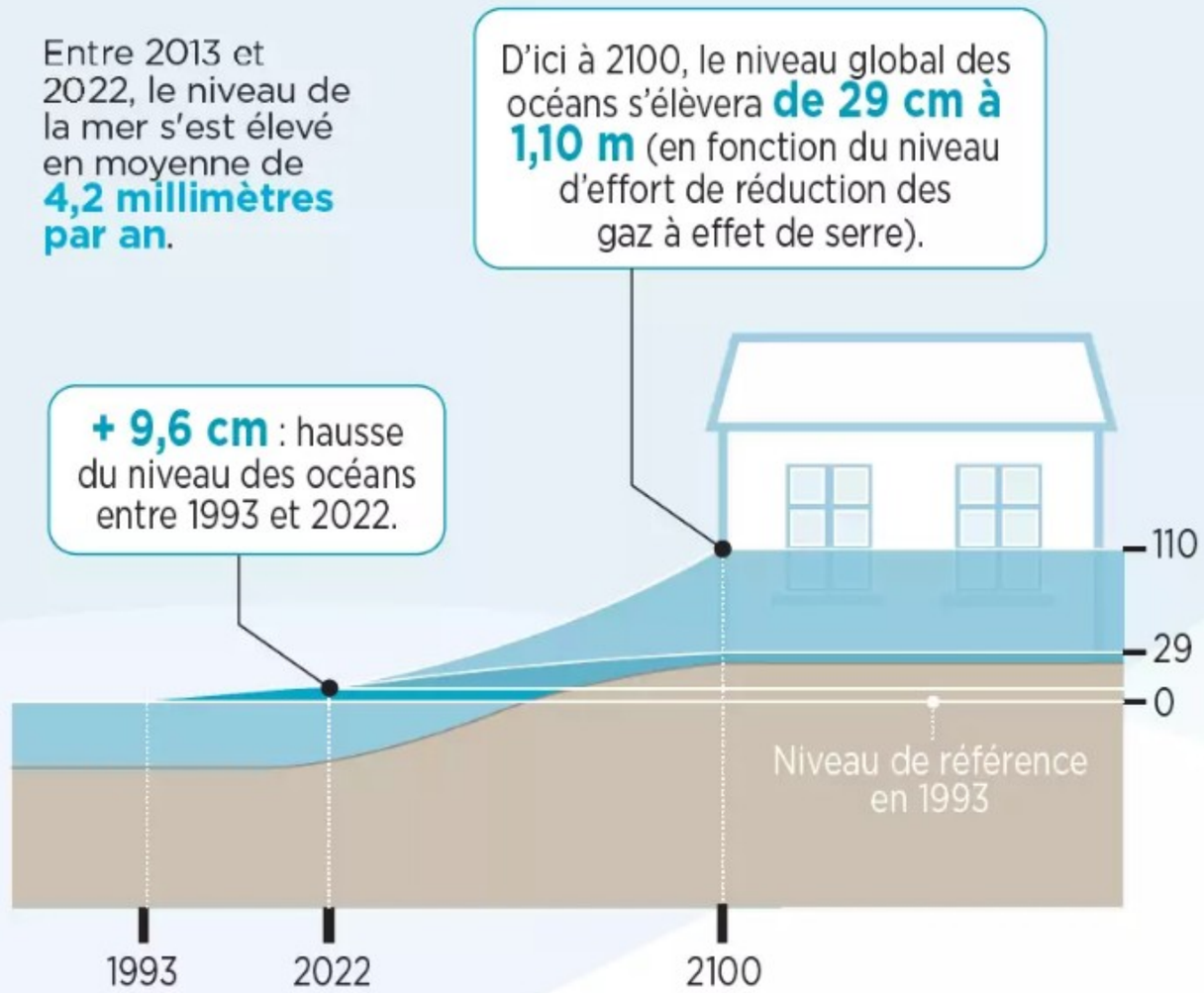
Il absorbe **30 % du CO_2** (les forêts : 18 %) et **93 %** de l'excès de chaleur engendré par les activités humaines.

Le 15 août 2024, la température médiane de surface de la Méditerranée atteignait **28,9 °C**. Un record. Cinq jours plus tôt, on relevait **30,8 °C** au large de Porto-Vecchio (Corse).

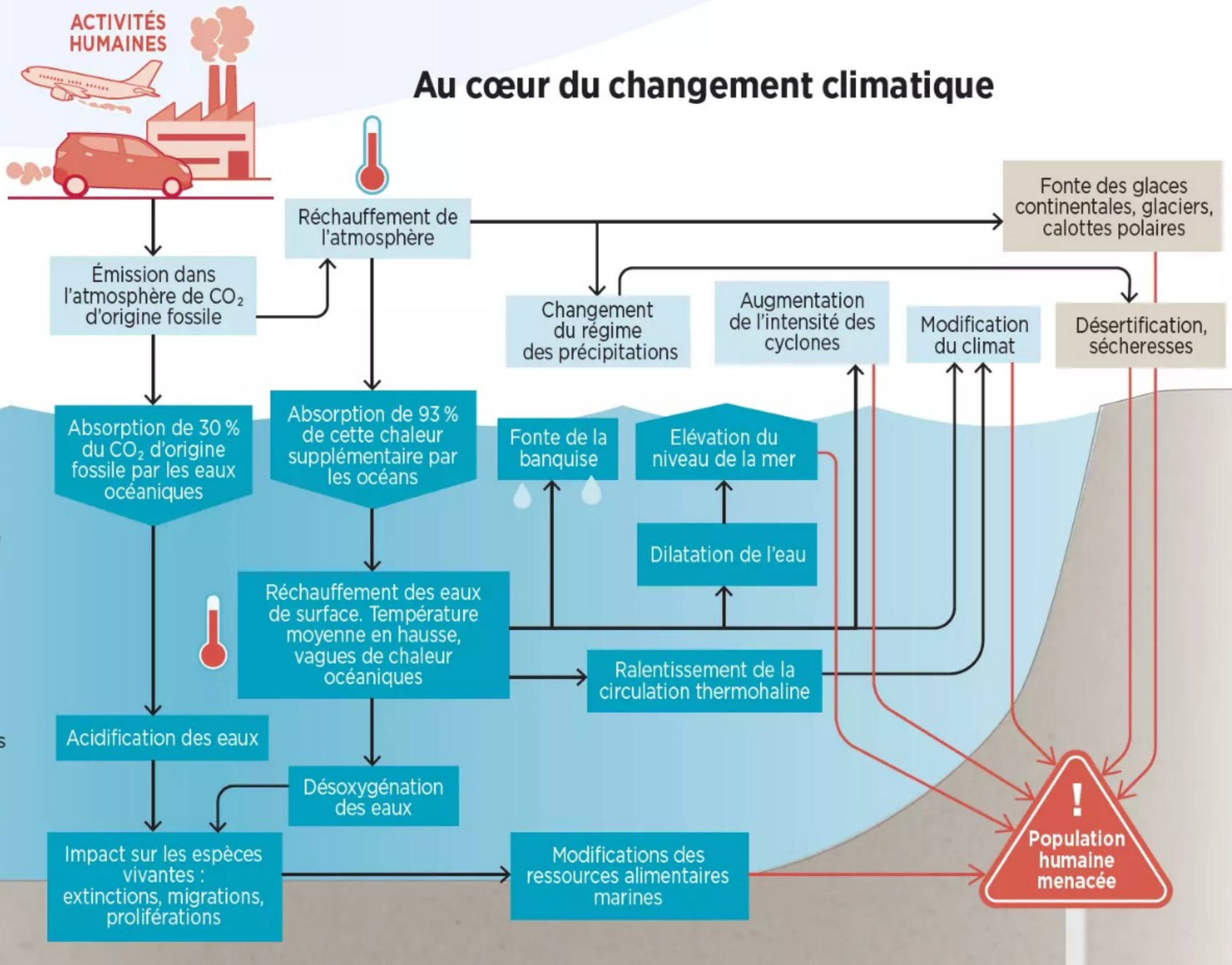
Au cours de sa vie, une baleine séquestre **33 tonnes de CO_2**. Un arbre : 20 kg/an.

Quand la mer monte…

Entre 2013 et 2022, le niveau de la mer s'est élevé en moyenne de **4,2 millimètres par an**.

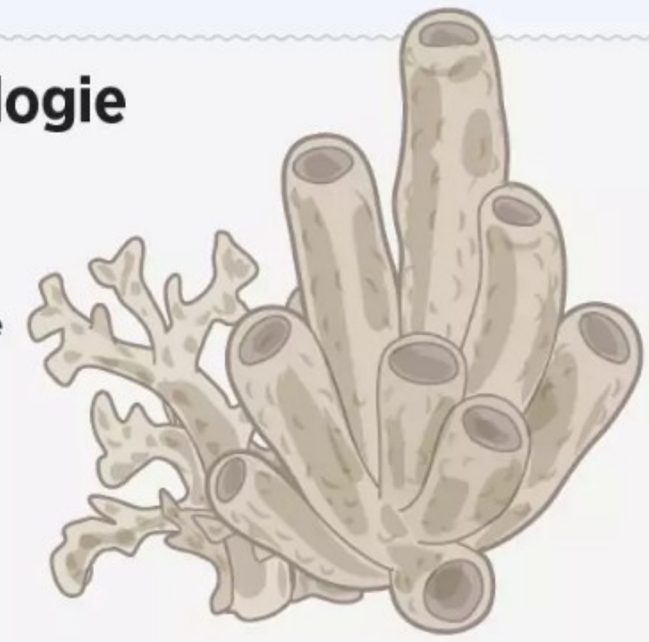


Au cœur du changement climatique



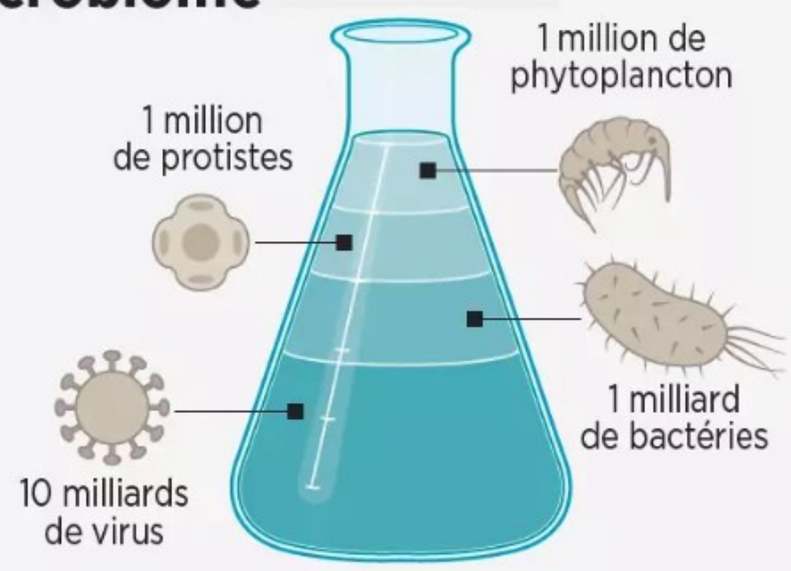
À mesure qu'il absorbe des quantités croissantes de chaleur et de CO_2, l'océan se dérègle. Il contribue dès lors au changement climatique qui affecte l'ensemble des organismes et, parfois durement, les populations humaines.

Pharmacologie



25 000 produits et substances d'intérêt pharmacologique proviennent d'organismes marins, dont **30 % sont extraits de quelque 8 000 espèces répertoriées d'éponges.**

Microbiome



Un litre d'eau de mer contient de 10 à 100 milliards de microorganismes, dont la taille varie de 1 micromètre à 1 centimètre. Ils contribuent à la production d'oxygène, la fabrication de matière organique et la chaîne alimentaire.

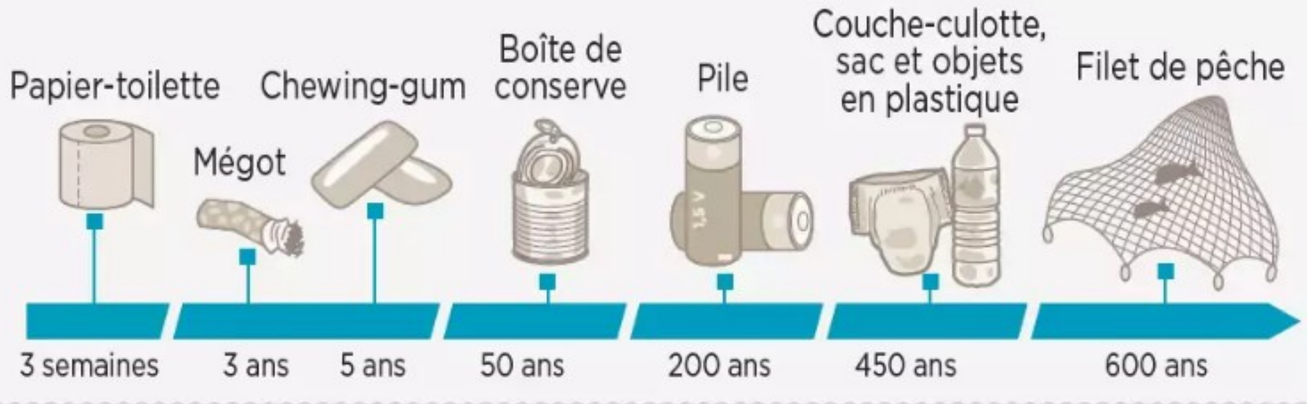
Pollution

Le « continent de plastique » ou gyre du Pacifique Nord couvre **1,6 million de kilomètres carrés** sur une profondeur de 10 mètres. Masse estimée : 100 000 tonnes.

85% des déchets marins sont constitués de plastique, dont la moitié à usage unique.

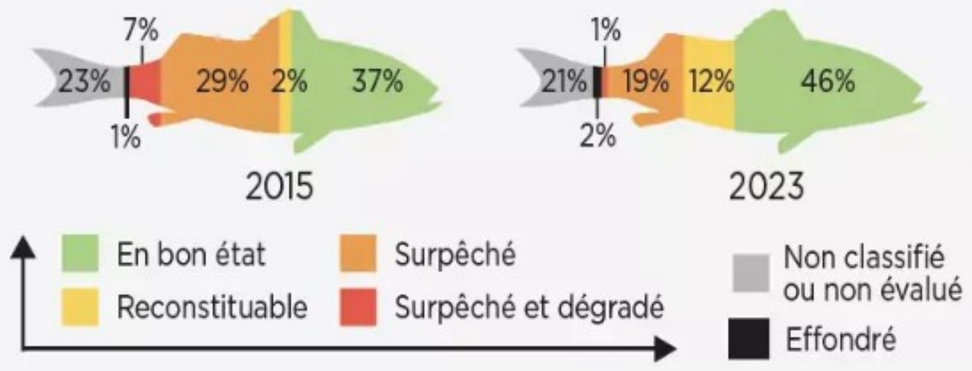
Chaque minute se déverse dans l'océan l'équivalent d'**un camion poubelle** de déchets plastiques.

Durée de vie des déchets dans l'océan

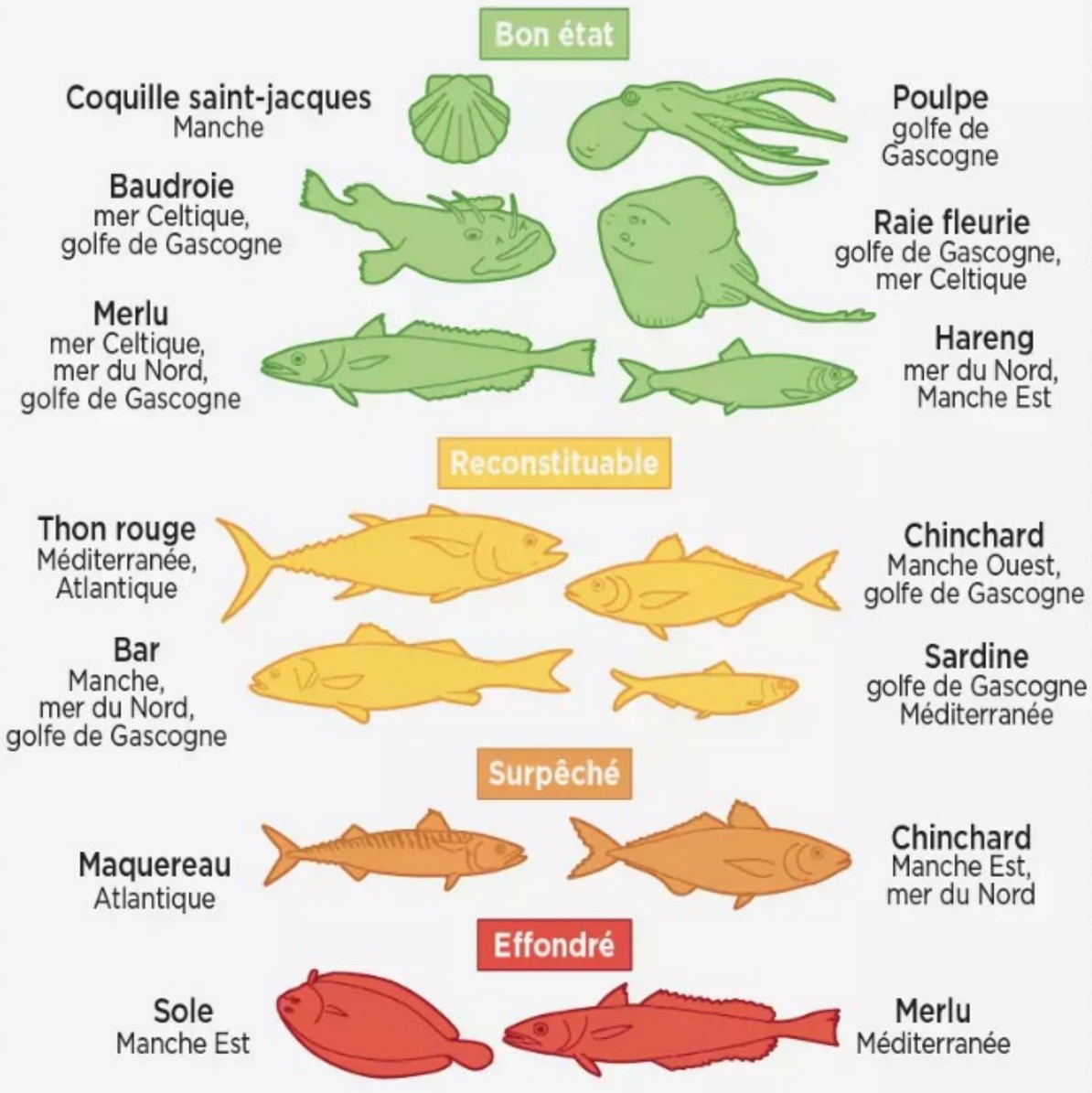


Pêche

Stocks de poissons exploités en France



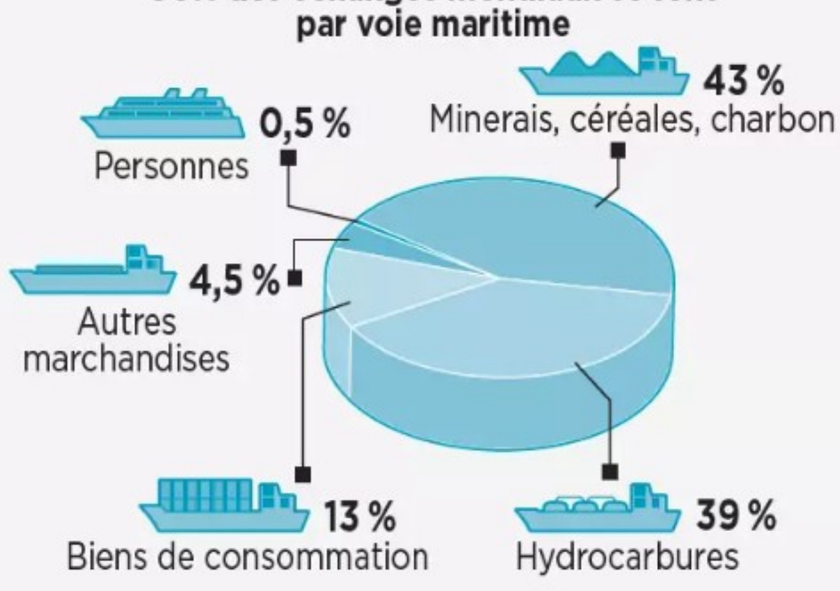
État des stocks de poissons, en France



Plus de 300 000 tonnes de poissons sont pêchés chaque année en France hexagonale. La proportion de prises issues de stocks exploités « durablement » est passée de 39 à 58 % en huit ans, ce qui est encourageant. On observe cependant une baisse marquée du renouvellement des générations chez certaines populations qui peinent à se reconstituer.

Transports

90% des échanges mondiaux se font par voie maritime



UNOC 2025 DES AVAN

Dix ans après l'adoption de l'Objectif de développement durable consacré à la santé de l'océan, l'ONU organisait à Nice en juin dernier un sommet en forme de bilan.

Avec 12 000 participants et plus de 80 chefs d'État et de gouvernement, la troisième Conférence de l'ONU pour l'océan a doublé le nombre d'acteurs par rapport à l'édition précédente, à Lisbonne, en 2022. L'Unoc est un rendez-vous instauré en 2015 pour faire un point régulier sur l'état d'avancement du 14e Objectif de développement durable (ODD), consacré à la santé physique, chimique et biologique de l'océan et à la réduction des pressions exercées par les humains sur ce milieu. Sur les 17 ODD adoptés en septembre 2015 par 195 États pour résoudre les principaux problèmes de l'humanité, l'ODD 14 est le seul qui fasse l'objet de conférences régulières, du fait du rôle central de l'océan sur le fonctionnement du climat.

L'Unoc n'est donc pas une instance de décision comme peuvent l'être les COP sur le climat ou la biodiversité. C'est un moment d'échange, destiné à faire le point sur les progrès et les retards dans l'atteinte des « cibles » comme la fin de la surpêche, l'arrêt des pollutions ou la création d'aires marines protégées. Les décisions et leur mise en œuvre dépendent d'autres instances, comme l'Autorité internationale des fonds marins ou le Traité sur la haute mer qui entrera en vigueur en 2026.

En théorie, cette conférence sur l'océan devrait disparaître en 2030, à l'échéance des ODD. La dernière Unoc devra ainsi dresser le bilan des succès et des échecs de la communauté internationale dans ses efforts pour sauver l'océan, et donc le climat.

LOÏC CHAUVEAU

ONG et société civile étaient présentes en force lors des différents événements de l'Unoc. Ici, une Marche bleue sur la promenade des Anglais.

CÉES EN TROMPE-L'ŒIL

VALERY HACHE / AFP

Pour les ONG, le compte n'y est pas

Les États ont pris d'énormes retards dans l'atteinte des objectifs. Sauf pour la haute mer, Nice n'aura pas changé fondamentalement la donne.

« *La science est de retour, l'écologie est de retour, le multilatéralisme est de retour !* » À l'heure du bilan, la ministre française de la Transition écologique, Agnès Pannier-Runacher, s'est faite lyrique. Les résultats engrangés lors de cette semaine d'échanges entre États attestent – selon elle – qu'il y aura « *un avant et un après Nice* ». Une assertion que l'on ne pourra pas vérifier avant 2030 et la réalisation complète des 17 cibles de l'ODD 14, l'objectif du développement durable qui ambitionne de « *conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable* ».

L'appel de Nice pour la réduction de la production plastique

« *Il y a eu à Nice des progrès indéniables qui démontrent que ces discussions multilatérales restent indispensables* », juge Julien Rochette, en charge du dossier Océan à l'Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI/Sciences po). Au niveau mondial, la surface des aires marines protégées est ainsi passée de moins de 8 % actuellement à près de 12 %, une augmentation assortie de promesses répétées de surveillance effective. Les États s'étaient cependant engagés à protéger 30 % de l'océan dans le cadre de l'"accord de Kunming-Montréal adopté en décembre 2023. L'initiative la plus spectaculaire vient du président de la Polynésie française, Moetai Brotherson, qui a annoncé la protection de près de 23 % des eaux de son territoire. Deux zones totalisant 900 000 kilomètres carrés de l'océan Pacifique deviennent ainsi la plus grande aire marine sous surveillance effective au monde. En France métropolitaine, les aires où les activités humaines seront drastiquement réduites, avec interdiction du chalutage, passent de 0,1% à 4%, « *soit une augmentation par 40* », se félicite Agnès Pannier-Runacher. « *Ce sont 10 % qui sont demandés !* », rétorquent les ONG, tandis que Frédéric Toulliou, président de la filière pêche française, rappelle « *qu'il ne peut y avoir de protection durable des océans sans une écoute active de ceux qui les habitent, les exploitent et les préservent* ».

Autre sujet brûlant : la pollution plastique. Le 10 juin, « l'appel de Nice » exigeant la réduction de la production de l'ensemble des « polymères plastique primaires », soit les matériaux utilisés pour la première fois pour les usages plastiques, a été adopté ◆◆◆

SWNS/ABC/ANDIA.FR

Documenter l'invasion du plastique en mer et la réaction des espèces qui vivent dans ces masses de polluants permet de sensibiliser le public. Ici, le plongeur Richard Horner à Bali, Indonésie.

◆◆◆ par 95 États. Car la production s'envole : 460 millions de tonnes en 2024… et cela pourrait tripler d'ici 2060. Ces États se sont clairement positionnés avant le cinquième round de négociations sur lles sujet qui aura lieu à Genève en août prochain, opposant les pays producteurs, Chine en tête, aux pays pollués, en premier lieu les petits territoires insulaires.

Pas de décision politique sans prise en compte de la science

La lutte contre la pêche illicite, non déclarée, non réglementée (INN), a fait peu de progrès à Nice. Le combat a lieu à la FAO qui pilote l'accord dit « du ressort de l'état du port ». En signant ce texte, les États s'engagent à refuser l'accès à leurs quais de déchargement à tout bateau suspecté de pêcher sans licence. La Chine a été le 108e État à le parapher le 25 avril dernier. Or, la production chinoise représente 15 % du volume mondial des captures et compte 342 000 bateaux de pêche motorisés. Son adhésion pèse donc très lourd. La protection de certaines espèces marines a également progressé. Ainsi, neuf pays et une soixantaine d'ONG ont lancé une coalition pour enrayer l'extinction des requins et des raies.

Le traité pour le statut juridique de la haute mer, dit BBNJ, a, lui, engrangé une vingtaine de ratifications pour atteindre 51 États signataires. Les 60 nécessaires à la mise en œuvre devraient être atteints fin 2025. Nice a également été le théâtre d'une déclaration spectaculaire de l'ONU, de l'Union européenne et de l'ensemble des États présents contre l'exploitation des fonds marins, en réponse au récent décret du président des États-Unis autorisant la recherche minière dans les zones marines américaines et en haute mer.

Toutes ces avancées ne sauraient cacher l'énorme retard pris dans la réalisation de l'ODD14. 2020 était la date butoir pour quatre « cibles » : la gestion durable des littoraux, la réglementation « efficace » de la pêche et la fin de la pêche illicite, l'arrêt des subventions aux bateaux responsables de la surpêche, la préservation de 10 % des littoraux du monde. Elles n'ont évidemment pas été atteintes. Un autre objectif devait être rempli en 2025 : *« prévenir et réduire nettement la pollution marine de tous types, en particulier celle résultant des activités terrestres »*. Le monde ne sera pas, là non plus, à l'heure… même si la prise de conscience d'une pollution généralisée des océans pourrait déboucher sur un texte international encadrant l'action contre les déversements en mer via les fleuves. 10 % des cibles de l'ODD14 sont en progrès, 50 % connaissent des avancées marginales, 40 % sont en stagnation ou en régression. C'est l'un des plus mauvais scores des 17 ODD.

Si Agnès Pannier-Runacher se félicite du retour de la science, de l'écologie et du multilatéralisme, c'est évidemment en réponse à l'actuelle administration américaine, qui a brillé par son absence à Nice. L'engagement de ne plus prendre aucune décision politique sans avoir vérifié ce qu'en dit la science a été l'un des leitmotivs de cette semaine niçoise. La création du baromètre Starfish, indiquant chaque année l'état de l'océan à partir des données scientifiques, est l'une des grandes avancées du sommet. Les connaissances sont désormais suffisantes pour fournir une image réelle de cinq domaines, représentés par les cinq bras de l'étoile de mer : la santé des océans, les pressions humaines, les impacts sociétaux, les progrès en matière de protection, et les bienfaits de l'océan. *« Nous avons rapidement décidé d'aller au-delà de la description de l'état physique, biochimique et de la biodiversité de la mer pour aborder d'autres questions essentielles,* résume l'océanographe Marina Levy, et l'une des auteurs de ce baromètre. *Que fait-on, en bien ou en mal, à cet écosystème ? Et que nous rapporte-t-il à nous, humains ? »* **L. C.**

Avant la politique... la science

En prélude à la conférence des Nations unies était organisé un congrès scientifique, le One Ocean Science Congress. Zoom sur les trois questions les plus brûlantes et les plus disputées.

1 La solution chinoise : la géo-ingénierie pour capter le CO_2

À Nice, les chercheurs chinois ont débarqué en force, notamment pour promouvoir leurs solutions de décarbonation de l'atmosphère via le milieu marin. Ils entendent déployer des stratégies visant à exploiter la capacité naturelle de l'océan à absorber du CO_2 pour atténuer le changement climatique. Dès les premières interventions, le ton était donné. La croissance de l'Empire du Milieu ne se fera pas sans émission de CO_2. Par conséquent, pour respecter ses engagements environnementaux, il lui faut miser sur des techniques de remédiation, autrement dit l'amplification des processus naturels. Entre autres : déverser dans l'océan des tonnes de nutriments (notamment du fer) pour stimuler la croissance du phytoplancton, qui capte le CO_2 par photosynthèse ; augmenter l'alcalinité de l'eau en y ajoutant des minéraux basiques (comme de l'olivine broyée ou de l'hydroxyde de calcium), ce qui permettrait de dissoudre le CO_2 atmosphérique, etc. *« L'olivine semble la meilleure candidate, du fait de sa grande capacité à capter le CO_2,* explique Frédéric Gazeau, chercheur au Laboratoire d'océanographie de Villefranche. *Mais elle relâche des éléments toxiques dans l'océan. Par ailleurs, sa prodution et son transports sont très coûteux. Pour notre part, nous étudions la solution de broyats de coquilles d'huîtres. Elles sont aujourd'hui incinérées et relâchent du CO_2 dans l'atmosphère, alors qu'elles pourraient le capter pour longtemps dans les fonds. »*

2 La restauration des espaces côtiers, une priorité

Au nombre des dix recommandations scientifiques formalisées par les chercheurs réunis en amont de l'Unoc, figurait – et en bonne place – la nécessité de protéger et restaurer les écosystèmes marins et côtiers. À ce titre, plusieurs expériences « heureuses » ont été relatées par des chercheurs et des ONG, notamment au Vietnam et en Birmanie, concernant les mangroves. Celles-ci constituent l'un des écosystèmes les plus efficaces au monde pour la séquestration du carbone, qu'elles stockent à un rythme jusqu'à quatre à dix fois supérieur à celui des forêts tropicales terrestres. Or, depuis les années 1980, environ 20 % à 35 % des mangroves ont disparu, notamment au profit d'élevages de crevettes, mais aussi d'infrastructures touristiques.
Les chercheurs recommandent donc *« d'augmenter les surfaces de mangroves avec un statut de conservation de 40 à 80 % sécurisés »*. L'objectif à l'horizon 2030 est d'atteindre *« plus de 6,1 millions d'hectares supplémentaires ».* Parmi les autres initiatives prometteuses : la restauration durable des zones humides en régions côtières, notamment en Méditerranée, et l'instauration de récifs d'huîtres, qui stabilisent les sédiments riches en carbone et favorisent leur enfouissement. Autres acteurs environnementaux notables dans la lutte contre l'emballement climatique : les herbiers marins et les prés salés, importants réservoirs de carbone.

3 Mieux comprendre le rôle des grands fonds

L'océan recèle des formes de vie qui échappent encore largement à notre compréhension. L'une des sessions du One Ocean Science Congress a notamment pointé l'existence d'une biosphère profonde présente dans les sédiments marins et la croûte océanique, qui puise son énergie non pas dans la photosynthèse, mais dans les réactions géochimiques du sous-sol terrestre, notamment les sources hydrothermales, les suintements de méthane et autres sources de carbone.
Plus haut dans la colonne d'eau se déploient, entre 1000 et 6000 mètres de profondeur, de vastes draperies de « neiges marines », objet d'étude du biologiste français Lars Stemmann au Laboratoire d'océanographie de Villefranche. Il s'agit de particules organiques de tailles et de couleurs diverses, qui chutent lentement vers les fonds marins. Environ 10 % atteignent les abysses, servant de base alimentaire à une faune encore mal connue. Les grands fonds sont animés par des flux de matière, des migrations verticales de plancton qui alimentent notamment de gigantesques groupes de rhizaires – organismes généralement unicellulaires, d'une taille allant jusqu'à 1 centimètre – dont le rôle écologique et biogéochimique reste obscur.
Or tous ces écosystèmes peu accessibles jouent forcément un rôle dans les cycles planétaires, et notamment celui du carbone. *« Ce déficit fondamental de compréhension prédictive rend quasi impossible toute anticipation sur la résilience de ces systèmes face au changement climatique*, souligne Lars Stemmann. *Cela devient critique pour évaluer les impacts futurs sur l'écologie des grands fonds. »* **SYLVIE ROUAT**

OLIVIER POIVRE D'ARVOR
Ambassadeur pour les pôles et les enjeux maritimes, écrivain

« L'océan est sous pression, mais il n'est pas à l'agonie »

Pollution, pêche illégale ou montée des eaux, aucun de ces fléaux n'est insurmontable. À condition de mettre en place une nouvelle forme de gouvernance des mers et des océans.

En juin dernier, l'Unoc a été précédée par un grand congrès scientifique, le One Ocean Science Congress (OOSC). Pour quelles raisons a-t-il été organisé ?
À l'issue des deux précédentes éditions de l'Unoc, en 2017 et 2022, nous avons fait le constat que lors de ces grandes conférences, on parle souvent de choses qu'on ne maîtrise pas suffisamment. Les chefs d'entreprise annoncent des mesures faramineuses dont on ne voit pas toujours les résultats, les politiques promettent qu'ils vont laver plus bleu… Certes, les ONG font entendre leur voix, mais les scientifiques ne sont que trop peu invités. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de commencer par ce congrès, piloté par François Houllier, président de l'Ifremer, et Jean-Pierre Gattuso, du CNRS. Près de 2500 chercheurs sont venus présenter des papiers et des posters. Et leurs recommandations ont été annoncées à l'Unoc, afin que tout un chacun puisse disposer d'une information scientifique robuste.

Sur l'aspect scientifique, justement, quels sont les principaux engagements pris à l'Unoc ?
La création de l'Ipos, bien sûr *(lire la Rencontre p. 6 à 9)*. Et puis, des instruments scientifiques inédits vont être produits. En particulier un indicateur très précis de la santé de l'océan, le baromètre Starfish, qui sera publié tous les 8 juin à l'occasion de la Journée mondiale de l'océan. Deux polytechniciens sont à la manœuvre : Pierre Bahurel, le patron de Mercator Océan, à l'origine du jumeau numérique de l'océan, et l'océanographe Marina Lévy. Mercator, qui est une société privée, est d'ailleurs appelée à se transformer en organisation intergouvernementale.

D'autres chantiers d'envergure sont-ils prévus ?
Le plus important est sans doute l'alliance Space 4 Ocean, qui va permettre aux agences spatiales de s'engager sur la connaissance, l'observation et la cartographie de l'océan. Celle-ci sera partie prenante dans une première grande mission internationale : la mission Neptune, la plus ambitieuse campagne océanique jamais entreprise, réunissant l'Europe, le Brésil, le Mexique et l'Inde. Son objectif est d'approfondir notre connaissance de la planète bleue en mobilisant, pour les quinze ans à venir, les flottes océanographiques et spatiales de ces pays. Cette mission a été initiée par l'Ifremer, mais on se dirige probablement, d'ici deux ans, vers la création d'un consortium, afin que ces données servent à tous.

D'autres événements majeurs ont également eu lieu en marge de l'Unoc…
Outre l'OOSC, nous avons effectivement souhaité organiser deux autres sommets sur des sujets cruciaux. L'un, autour des problématiques affectant le littoral. Nous avons donc invité près de 400 acteurs locaux – élus, présidents de région, dirigeants insulaires, etc. – représentant 800 millions de personnes directement concernées, notamment par l'élévation du niveau de la mer, afin qu'ils fassent entendre leur voix. Avec l'idée de mettre en place une coalition, l'Ocean Rise and Coastal Resilience Coalition, appelée à se réunir tous les ans et à proposer des plans d'adaptation, des schémas d'atténuation, et à communiquer inlassablement sur ce sujet. Car le niveau de la mer risque de monter d'un mètre d'ici à 2100. Et 2100, c'est demain !
Enfin, nous avons souhaité intégrer l'économie et la finance dites bleues qui, elles aussi, doivent faire l'objet de coalitions d'acteurs économiques et financiers. Le Blue Economy and Finance Forum s'est tenu à Monaco, avec pour objectif de donner à l'Unoc

« Il y a certes les décisions unilatérales des États-Unis. Mais, en face, un groupe de pays incluant même la Chine… »

PATRICE NORMAND/LEEXTRA VIA OPALE.PHOTO

les décisions – et non les recommandations – qui ont été prises par le secteur. L'économie bleue, c'est pour moitié – 50% du revenu – les hydrocarbures et le tourisme ; l'autre moitié regroupant la pêche et le transport maritime. Concernant les hydrocarbures, il faut opérer une bascule au profit des énergies renouvelables. Pour ce qui est du tourisme, nous appelons à une large remise en question des pratiques – au-delà du *bluewashing* avant tout destiné aux clients. Reste qu'il est difficile d'y contraindre les professionnels… Enfin, concernant la pêche illégale, un certain nombre d'accords existent. Il faut maintenant que les Parlements les ratifient.

L'actualité, c'est aussi, depuis le début de l'année, les décisions pour le moins hasardeuses du président Trump.

La menace est réelle. Pour autant, l'excellente contribution de la présidence Trump, c'est justement de faire de l'océan un combat. Alors que jusqu'alors, c'était une sorte d'objet vaguement consensuel – personne n'est contre l'océan ! On a, certes, les États-Unis d'un côté, avec leurs décisions unilatérales inacceptables. Mais, de l'autre, un groupe de pays incluant même la Chine. Ce multilatéralisme est indispensable. Sinon, on est foutu ! Les problèmes de l'océan sont moins compliqués à gérer que le changement climatique – on va arriver à + 4 °C, et ce n'est pas une bonne nouvelle. Mais ils ne peuvent être résolus que si tout le monde s'y met. On ne peut pas réfléchir à l'avenir du Groenland sans avoir en tête celui des Kiribati. Que le Groenland soit racheté par les États-Unis ou noyé sous les investissements chinois… il va fondre. Et l'effet va se ressentir aux Kiribati ou ailleurs. Alors, oui, l'Unoc est devenu un sommet de combat.

Olivier Poivre d'Arvor,
Voyages en mers françaises,
Place des Victoires, 2022

L'urgence est là…

L'océan est sous pression, mais il n'est pas à l'agonie. On sait restaurer une mangrove, on peut faire revivre des espèces si elles n'ont pas complètement disparu. Le seul vrai problème, insoluble ou presque, c'est la transformation vertueuse de certaines industries. Je pense par exemple que tant qu'il y aura des producteurs d'hydrocarbures, il sera difficile de convaincre qu'il faut arrêter de produire du plastique à usage unique. Mais pour le reste, on peut y arriver. Voyez la décarbonation en cours du transport maritime : il n'est pas illusoire de penser qu'on atteindra l'objectif zéro carbone d'ici à 2050 !

Cela passe nécessairement par une nouvelle forme de gouvernance…

Absolument. Il faut pouvoir réguler, régler, mais aussi juger et faire payer ceux qui ne seraient pas dans la ligne. Et le droit fait défaut sur deux sujets : les grands fonds et la haute mer. Les premiers sont régis par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) – qui, manifestement, n'impressionne pas beaucoup le président américain. Quant au deuxième, il faut rappeler que la mer est une sorte de copropriété où chacun a sa zone économique exclusive (ZEE). Au-delà, il y a un espace commun, immense et vide de toute législation : la haute mer. Pour nous, un point important, c'est que d'ici à la fin de l'année, le Traité international pour la protection de la haute mer et de la biodiversité marine – aussi appelé BBNJ, d'après son acronyme anglais, soit ratifié. Il ne l'a été que par un pays parmi ceux possédant les dix plus grandes ZEE, c'est-à-dire États-Unis, Russie, Australie, Nouvelle-Zélande et autres. Il se trouve que c'est la France. Il y a une forme d'irresponsabilité ! Il en faut soixante pour que le traité soit mis en œuvre. Ce nombre est également nécessaire pour qu'une première COP (Conférence des parties) puisse se réunir sur le sujet. Les décisions prises seront, enfin, alors contraignantes.

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA

Grâce à des mesures préventives, les échouages de dauphins (ici, sur l'île de Ré en Charente-Maritime) ont diminué en 2024.

XAVIER LEOTY/ PHOTOPQR/SUD OUEST/MAXPPP

DAUPHINS

Échec aux échouages !

Pour la deuxième année consécutive, début 2025, les pêcheurs du golfe de Gascogne ont dû rester à quai près d'un mois pour éviter de capturer accidentellement des dauphins. Avec plus de 3000 échouages, l'année 2023 avait connu un triste record… venant conclure une longue série. *« Depuis cinquante ans et la création du Réseau national échouage (RNE), on oscillait entre 400 et 500 échouages par an sur l'ensemble du littoral français. C'est à partir de 2016 que ce nombre a augmenté de manière spectaculaire »*, raconte Jérôme Spitz, codirecteur de l'observatoire Pelagis, qui chapeaute le RNE (CNRS-La Rochelle Université). Chaque année, en hiver, sur la façade Atlantique, environ 25 espèces sont retrouvées, dont la majorité sont des dauphins communs. Ils présentent souvent des lacérations ou des hématomes au niveau de la tête, signes qu'ils se sont emmaillés dans les filets. Le dauphin se nourrit de petits poissons gras, comme les sardines et les anchois. *« Or, depuis quelques années, ceux-ci se sont rapprochés des côtes et forment de grands bancs proches du fond,* explique le chercheur. *Les dauphins communs viennent donc chasser dans ces zones… où les pêcheurs traquent la sole ou le merlu. »*

À partir des échouages et du travail d'observateurs sur les bateaux, Pelagis estime que depuis 2016, entre 5000 et 12000 dauphins communs ont été capturés accidentellement chaque année. *« Cette mortalité additionnelle n'est pas soutenable pour la pérennité de l'espèce »*, rappelle Jérôme Spitz. Le gouvernement a donc décidé d'une période d'interdiction de la pêche. Une mesure qui semble efficace. En 2024, on a retrouvé des niveaux d'échouages d'avant 2016.

MARIKA JULIEN

ÉLÉMENTAIRE

Le neutrino capté dans les profondeurs

Le 13 février 2023, un neutrino affolait les instruments de l'observatoire européen KM3NeT (Cubic Kilometre Neutrino Telescope). Objectif de cette colossale installation, en cours de déploiement en Méditerranée : piéger cette particule capable de traverser la Terre de part en part sans être arrêtée. Elle comprend 200000 capteurs de lumière glissés comme les perles d'un collier sur trois ensembles de 115 « lignes » optiques et électriques fixées au fond de la mer, à des profondeurs de 2475 et 3450 mètres. Le tout formant, sur un espace de plus d'un kilomètre carré, un gigantesque réseau en 3D destiné à mesurer le rayonnement émis dans le sillage des particules chargées créées par l'interaction des neutrinos avec l'eau. Le but : mieux connaître les propriétés de ces derniers, et découvrir la source des plus véloces d'entre eux – supernovas, sursauts gamma ou collisions d'étoiles.

Celle de l'événement de février 2023 a dû être d'une puissance phénoménale puisque, comme le rapportait en février dernier la revue *Nature*, elle est parvenue à booster l'énergie d'un neutrino jusqu'à des niveaux jamais observés pour une particule élémentaire, dépassant de trente fois le précédent record : 220 millions de milliards d'électrons-volts. Soit l'équivalent de l'énergie cinétique d'une balle de ping-pong de 2,7 grammes lancée à 18,4 kilomètres-heure… concentrée sur un objet au moins un million de fois plus léger qu'un électron !

KM3NET

L'un des modules optiques de l'observatoire KM3NeT.

VAHÉ TER MINASSIAN

ENVIRONNEMENT

Cinquante ans de protection du littoral

En 1975, c'est pour endiguer le bétonnage et la privatisation des côtes que le Conservatoire du littoral était créé, avec pour objectif de protéger d'ici à 2050 un tiers des côtes et rivages lacustres français. Comment ? Par l'acquisition foncière et la restauration écologique d'espaces abîmés. L'intégration dans le domaine public des zones menacées par l'artificialisation permet d'en réglementer l'accès sans en exclure certaines activités, tels la saliculture ou le pastoralisme. En un demi-siècle, le Conservatoire a ainsi acquis 18 % des littoraux français, soit plus de 218000 hectares répartis sur 840 sites en France métropolitaine et outre-mer. Mais si la menace de l'urbanisation n'est pas totalement écartée, le Conservatoire doit lutter contre un nouvel ennemi : le changement climatique. C'est l'objet notamment du projet Adapto. Face à l'érosion et à la submersion marine, celui-ci vise à explorer des solutions destinées à redonner de la mobilité au trait de côte, au lieu de construire digues et enrochements *(lire aussi p. 46-49).*

SYLVIE NADIN

PREMIÈRE RENCONTRE

Un calmar au poids colossal

C'est une première ! En mars dernier, un calmar colossal (*Mesonychoteuthis hamiltoni*) a été filmé dans son habitat naturel à plus de 600 mètres de profondeur. Bien loin des 7 mètres de long – et des 500 kilos – que ces céphalopodes peuvent atteindre à l'âge adulte, le spécimen observé ne mesurait que 30 centimètres. Il s'agissait en effet d'un bébé ! Jusqu'à présent, l'animal n'était connu que par des restes retrouvés dans l'estomac de cétacés ou d'oiseaux marins. Cette rencontre inédite a eu lieu au large des îles Sandwich du Sud, dans l'océan Atlantique, lors d'une expédition effectuée dans le cadre d'Ocean Census, un programme de recherche qui vise à découvrir de nouvelles formes de vie marine. Les images prises par le véhicule téléguidé de l'équipe du Schmidt Ocean Institute, à l'origine de cette observation, ont permis d'identifier l'espèce avec précision. En effet, la présence de crochets à l'extrémité des deux longs tentacules et au milieu de chacun des huit bras plus courts est une particularité des calmars colossaux. Cousins des calmars géants, qui peuvent atteindre jusqu'à 18 mètres de long, les calmars colossaux, plus petits par leur taille, sont en revanche les invertébrés les plus lourds de la planète. **SYLVIE NADIN**

Petit mollusque deviendra grand… Le bébé *Mesonychoteuthis hamiltoni* observé en mars dernier atteindra 7 mètres et 500 kilos à l'âge adulte.

ROV SUBASTIAN / SCHMIDT OCEAN INSTITUTE

POLLUTION

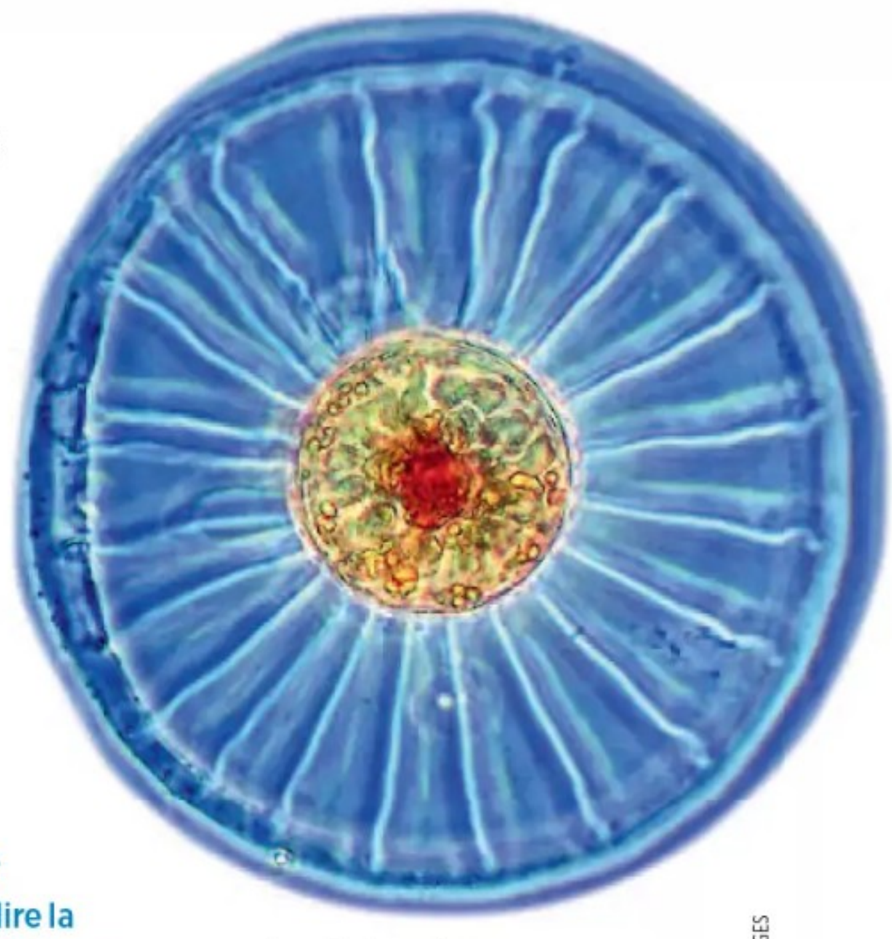
À la recherche des fûts nucléaires immergés

Dans les abysses de l'Atlantique Nord-Est gisent plus de 200 000 fûts de déchets radioactifs, jetés à la mer par plusieurs États européens entre 1946 et 1990. Cette période de développement du nucléaire militaire et civil a vu se multiplier les déchets de faible à moyenne activité : boues, liquides, mais aussi vêtements, gants, matériel, etc. Enrobés de bitume et de ciment, ils ont été immergés par plus de 4 000 mètres de profondeur. La campagne internationale Nodssum, portée par le CNRS, qui s'est déroulée du 15 juin au 11 juillet, vise à cartographier les zones d'immersion des fûts radioactifs au large du golfe de Gascogne grâce à un sonar embarqué sur le nouveau submersible autonome Ulyx de l'Ifremer. Les images enregistrées lors de ces plongées, les échantillons d'eau et de sédiments, les mesures des courants ainsi que les animaux collectés doivent permettre de comprendre le comportement des radionucléides dans les eaux profondes ainsi que leurs effets sur les écosystèmes marins. Une seconde mission doit à l'avenir déployer plus de robots pour s'approcher au maximum des fûts. **SYLVIE ROUAT**

BIOLOGIE

Les diatomées ont une bonne vue

Constituants majeurs du phytoplancton, les diatomées se démarquent par leur étonnante capacité à se « repérer » dans la colonne d'eau. Publiée en décembre dernier, une étude dirigée par Angela Falciatore et Marianne Jaubert (CNRS et Sorbonne Université) a révélé que ces microalgues sont dotées de photorécepteurs protéiques, appelés phytochromes, grâce auxquels elles peuvent détecter la profondeur optique, c'est-à-dire la quantité de lumière diffusée dans le milieu aquatique où elles se trouvent. Fortes de cette information, elles modulent leur activité photosynthétique en fonction de la quantité de lumière à disposition, ce qui leur permet de contrôler leur dépense énergétique. Seules les diatomées des hautes latitudes sont pourvues de ces récepteurs, ce qui les aiderait à évoluer dans les eaux tumultueuses de ces régions. **WILLIAM ROWE-PIRRA**



Les diatomées savent évaluer la quantité de lumière dont elles disposent.

JOHN DOLAN/CNRS IMAGES

Sous 150 mètres de glace, en Antarctique, ont été retrouvées une grande éponge, des anémones et d'autres formes de vie. On suppose qu'elles sont présentes depuis des décennies, voire des siècles.

SCHMIDT OCEAN INSTITUTE ROV SUBASTIAN

OASIS GLACIAIRE

La fracture d'un iceberg révèle un écosystème étonnant

Grands coraux, éponges, poissons des glaces, araignées de mer géantes, poulpes… Ce florilège d'espèces marines se trouvait là où personne ne s'y attendait : sous une couche de glace de 150 mètres d'épaisseur. Le 13 janvier, un iceberg de plus de 500 kilomètres carrés s'est détaché de la plateforme de glace George-VI, en Antarctique. Une équipe internationale du Schmidt Ocean Institute, en mission non loin de là, s'est empressée de se rendre sur zone. *« Nous ne nous attendions pas à trouver un écosystème aussi magnifique et aussi prospère,* a déclaré Patricia Esquete, écologiste marine à l'université d'Aveiro (Portugal), codirectrice scientifique de l'expédition. *Compte tenu de la taille des animaux, les communautés que nous avons observées sont là depuis des décennies, voire des siècles. »*
Or ces écosystèmes confinés sous la glace auraient dû être privés de nutriments, qui proviennent généralement de la surface. Les scientifiques du Schmidt Ocean Institute suggèrent que *« toute nourriture arrivée sur place a dû être transportée par les courants océaniques »*, via des rivières sous-marines alimentées par la fonte glaciaire de la plateforme. **SYLVIE NADIN**

FONDATION TARA

La Tara Polar Station se dirige vers le Grand Nord (vue d'artiste).

SOUCOUPE FLOTTANTE

Premiers tests pour Tara Polar Station

Le 1er juin, la Tara Polar Station a quitté Lorient, son port d'attache, pour cingler pour la première fois vers le Grand Nord. Cette base scientifique polaire dérivante aux allures de « soucoupe flottante » a pour mission d'étudier l'océan Arctique. Il s'agit de documenter pendant vingt ans l'impact du réchauffement climatique sur la biodiversité dans une région où les changements sont quatre fois plus rapides qu'ailleurs. Construit à Cherbourg, ce vaisseau ovale de 26 mètres de long, conçu pour supporter des températures allant jusqu'à –52 °C, résister à la pression de la banquise et abriter un équipage de 12 à 18 personnes avec 500 jours d'autonomie, réalisera cet été une dérive test dans le détroit de Fram (entre le Svalbard et le Groenland), puis hivernera dans le Svalbard en novembre. La première dérive au sein de la banquise arctique est prévue pour 2026. **SYLVIE ROUAT**

RESSOURCE

Sous la mer, l'eau douce

Alimentera-t-on un jour les régions littorales menacées par la sécheresse par de l'eau douce puisée en mer ? En plusieurs endroits du monde, en effet, sous le plancher océanique du plateau continental, des forages et des relevés électromagnétiques ont mis au jour d'importantes nappes de fluides faiblement salés dans des zones éloignées des côtes de plus de 50 kilomètres. À l'échelle du globe, ces aquifères marins contiendraient 1 million de kilomètres cubes d'eau – la consommation de la France sur 244 000 ans !
Depuis le 1er mai, une campagne d'exploration mobilise une quarantaine de scientifiques – dont des Français – en face de la Nouvelle-Angleterre (États-Unis). L'expédition 501 du programme international IODP3 consiste à forer les fonds sous-marins sur 550 mètres dans trois zones, en vue de récupérer des échantillons d'eau et de sédiments, de réaliser des mesures et de déposer des instruments dans des puits. *« Nous voulons réaliser la première étude détaillée d'un de ces réseaux hydrogéologiques et comprendre comment, et à quelle époque, il a été alimenté en eau douce »*, explique Brandon Dugan, professeur à l'École des mines du Colorado. Les géophysiciens ignorent encore si ces gisements offshore communiquent avec des aquifères terrestres. Et donc s'ils sont susceptibles d'être rechargés par les précipitations tombant sur le continent, ce qui en ferait des ressources renouvelables. Une condition *sine qua non* à leur éventuelle exploitation. **V. T. M.**

COMMUNICATION

La petite chanson des baleines reste une énigme

Le chant des baleines à bosse sera-t-il bientôt décrypté ? On sait déjà qu'il consiste en un assemblage d'unités sonores (ou notes) organisées et répétées pour former des phrases. Que chaque population possède ses propres chants, qui se modifient progressivement par l'intégration de nouveaux éléments vocaux, parfois sous l'influence d'une population voisine. Et que le chant est transmis culturellement, comme le langage humain. En février dernier, dans un article publié dans la revue *Science,* une équipe de recherche internationale y a retrouvé la même distribution statistique que dans toutes les langues humaines. Concrètement, dans le langage, la fréquence d'un mot est relativement prévisible : c'est la loi de Zipf. Par exemple, si le mot le plus fréquent d'un texte apparaît 1 000 fois, le deuxième mot le plus rencontré y figurera 500 fois, le troisième 333 fois, etc. Chez les humains, cette structure facilite l'apprentissage. Pour confirmer qu'il en est de même chez les baleines à bosse, les chercheurs ont analysé des enregistrements collectés pendant huit ans au large de la Nouvelle-Calédonie. Et ont retrouvé la même distribution.

Un mystère demeure : quelle est la signification de ces chants ? On sait que seuls les mâles chantent, bien que leurs générateurs vocaux (l'équivalent de nos cordes vocales) soient identiques à ceux des femelles. *« On parle de chant quand il y a une séquence de vocalisations dans le même ordre et répétée,* précise le bioacousticien Olivier Adam (Sorbonne Université). *Or, quand elle communique, avec son baleineau par exemple, la femelle ne répète pas deux fois la même phrase. »* Pour le moment, on n'a identifié que trois types d'animaux « chanteurs » : les mysticètes (les cétacés à fanons, comme la baleine à bosse), les oiseaux… et les humains.

M. J.

Seuls les mâles chantent, c'est-à-dire qu'ils vocalisent de façon ordonnée et répétée (ici, une baleine à bosse en Polynésie).

FABIEN MICHENET/BIOSPHOTO

MODÉLISATION

Le projet Argo Dome va décrypter un phénomène écologique unique

Situé dans l'océan Pacifique, le phénomène du dôme thermique du Costa Rica est une oasis de vie alimentée par une remontée d'eau froide (*upwelling* en anglais) riche en nutriments. En collaboration avec des scientifiques costariciens, des chercheurs du Laboratoire d'océanographie de Villefranche (LOV) étudient la zone depuis novembre 2024, dans le cadre du projet Argo Dome, grâce à l'immersion de « flotteurs » autonomes bardés de capteurs pouvant atteindre 2 000 mètres de profondeur. Ce dispositif de suivi en continu vise à obtenir une modélisation précise du dôme grâce à des données telles que le niveau d'oxygénation de l'eau, son acidité ou encore sa concentration en chlorophylle. À terme, il devrait aussi enregistrer les nuisances sonores émises par le trafic maritime. Autant d'éléments qui pourront servir de base à la création de la première aire marine protégée en haute mer.

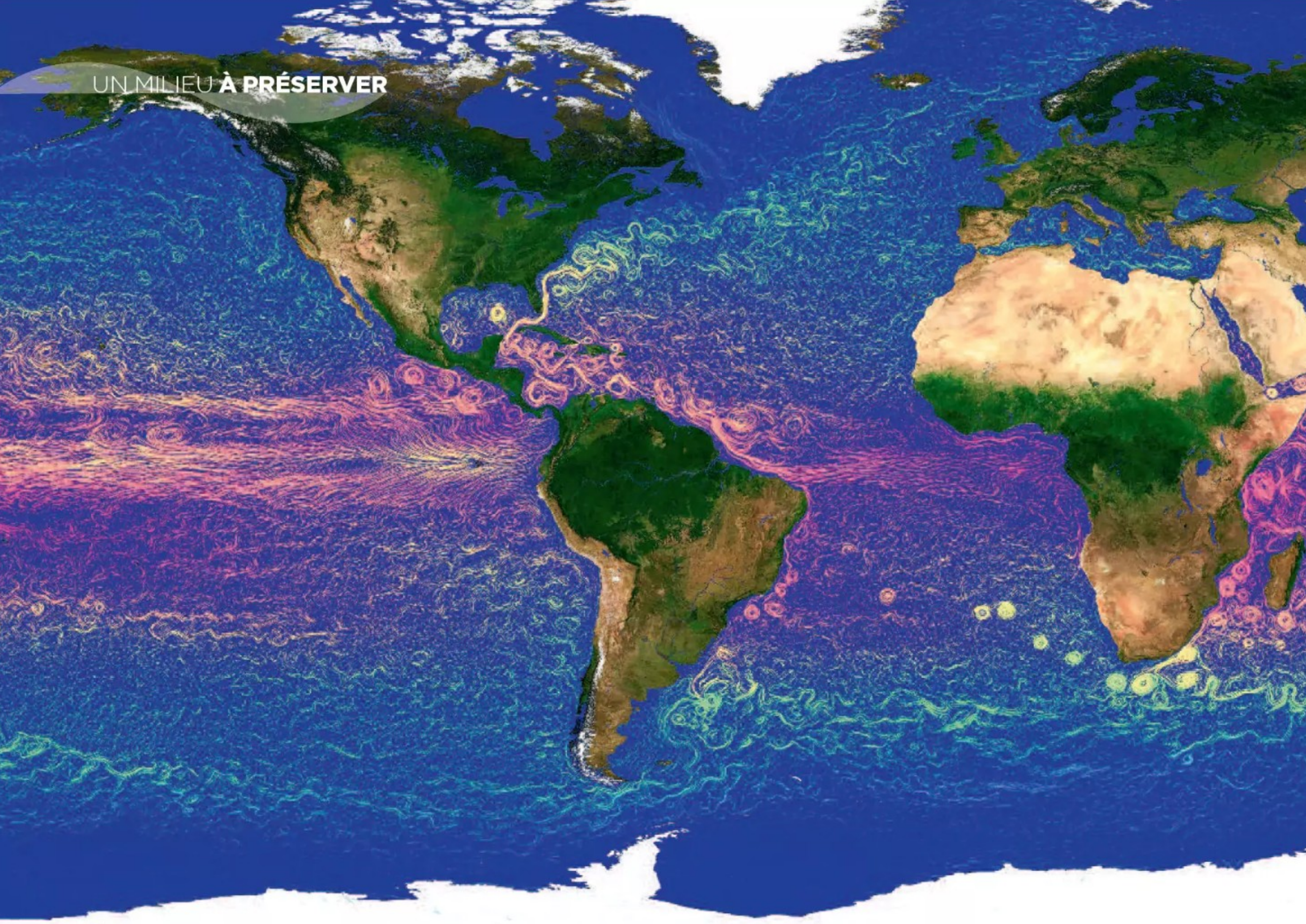
NICOLAS GUTIERREZ C.

UN MILIEU À PRÉSERVER

Les scientifiques sont aujourd'hui formels : l'océan est le grand modérateur du climat, une véritable éponge qui pompe 93 % de l'excès de chaleur que nous provoquons par nos activités. Ainsi qu'un réservoir inestimable de nourriture, de médicaments, de matériaux non polluants. Mais les espèces mutent, les écosystèmes sont bouleversés, le niveau monte en même temps que la température... Le temps de l'action est venu !

GABRIEL BARATHIEU / BIOSPHOTO

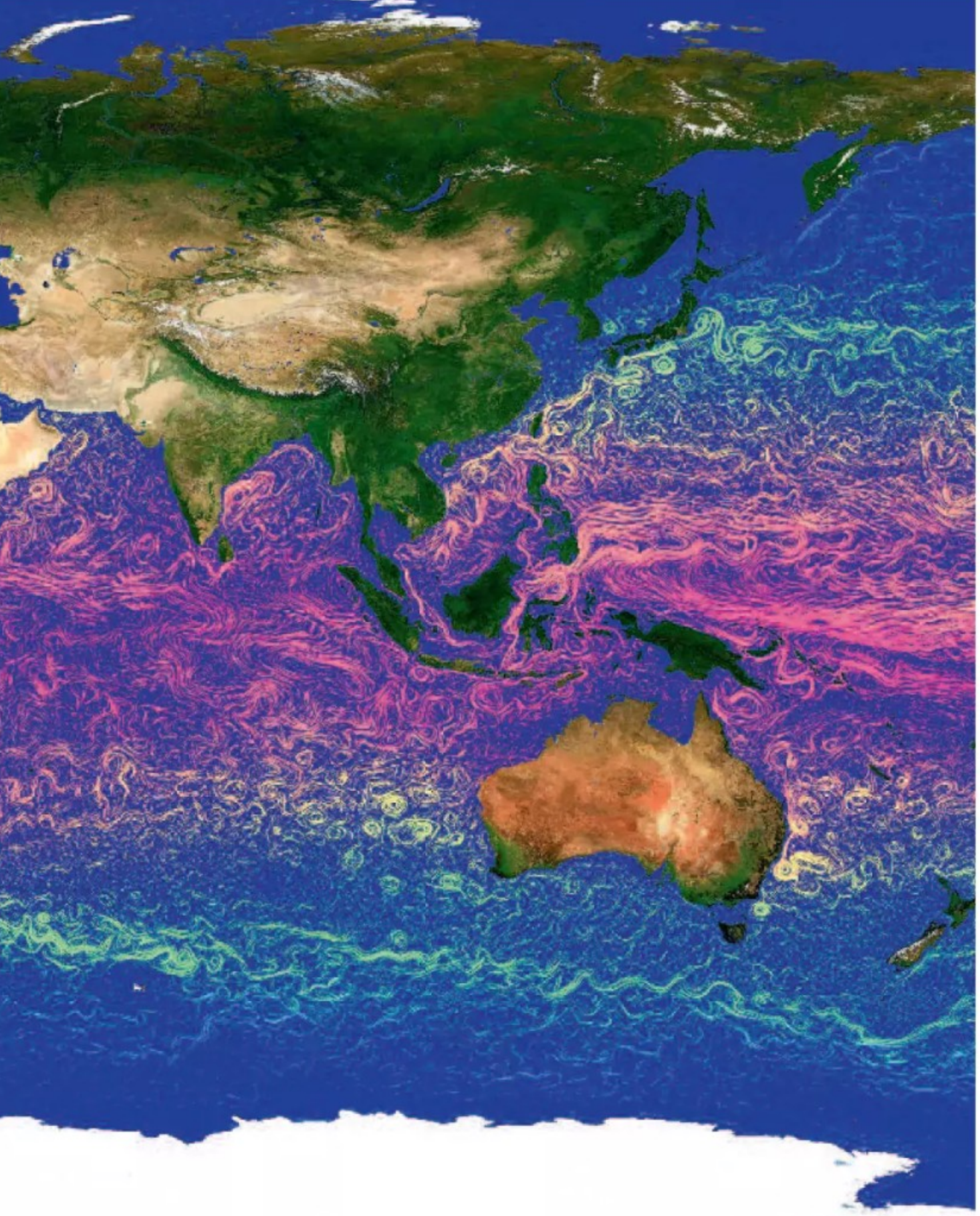
Demoiselles bleu-vert (*Chromis viridis*) se nourrissant de corail dans la passe en S, un chenal naturel situé à Mayotte (océan Indien) et classé réserve intégrale de pêche depuis 1990.



LE GRAND RÉGULATEUR DU CLIMAT

Par sa capacité d'absorption de la chaleur et du carbone, l'océan joue un rôle primordial de modérateur des phénomènes climatiques. Mais, face à l'accélération du changement climatique, cette « pompe » à CO_2 est en train de s'enrayer.

Depuis toujours, la Terre connaît une alternance de coups de froid et d'accès de fièvre. Les causes naturelles de ces flux et reflux sont connues : les variations de l'orbite de notre planète autour du Soleil. Lorsque celle-ci est loin de son astre, le climat se refroidit ; lorsqu'elle s'en approche, il se réchauffe. Ces cycles, dits de Milankovitch, du nom de leur découvreur serbe en 1941, n'auraient pas de grandes conséquences sur une planète de pierre. Mais la Terre, c'est d'abord de l'eau : 71 % de sa surface est couverte par l'océan. Une masse considérable, 300 fois plus importante que celle de l'atmosphère… et dont la capacité d'absorption de la



K. SCHNEIDER/SPL/SUCRÉSALÉ

Les courants océaniques globaux. Les couleurs indiquent les températures, allant des tropiques, chauds (rose), aux eaux plus froides (bleu) des latitudes plus tempérées. Infographie basée sur des données satellitaires.

chaleur est quatre fois supérieure. Qu'elle s'englace, s'évapore ou se liquéfie, et ce sont les conditions de vie de tous les habitants de la planète qui changent drastiquement.

Le 7 avril dernier, Freddy Bouchet, directeur du Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) au sein de l'Institut Pierre-Simon Laplace, inaugurait ainsi une rencontre-formation de l'École normale supérieure retraçant les 20 000 dernières années de l'histoire de la Terre, depuis le dernier maximum glaciaire. *« Le niveau de la mer était alors 130 mètres plus bas qu'aujourd'hui, et la température inférieure de 6 °C en moyenne*, détaillait-il. *Puis la Terre s'est réchauffée en plusieurs milliers d'années, et les conditions de vie de toute la biosphère se sont modifiées jusqu'à la situation actuelle. Le changement climatique en cours, lui, s'opère en seulement quelques décennies. »*

FRÉDÉRIQUE PLAS

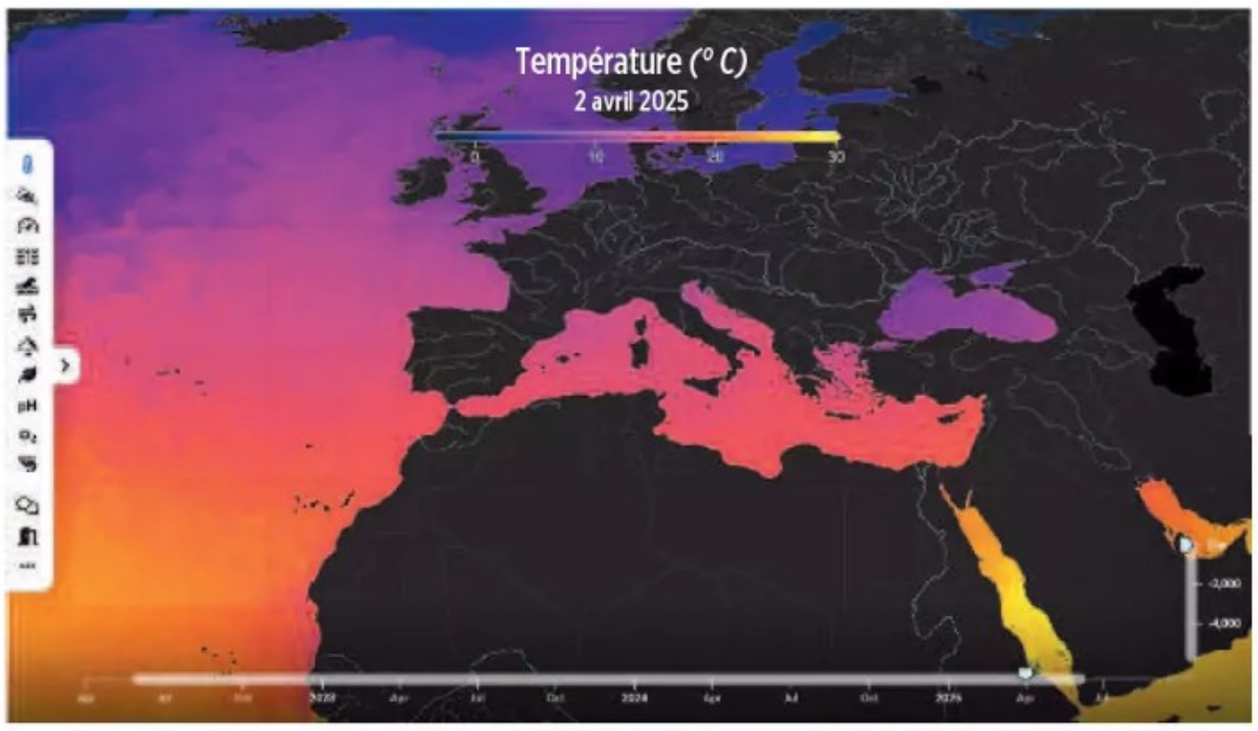
« L'INERTIE THERMIQUE DE L'OCÉAN EST GIGANTESQUE ET EN FAIT LE VÉRITABLE RÉSERVOIR DE CHALEUR DE LA MACHINE CLIMATIQUE »

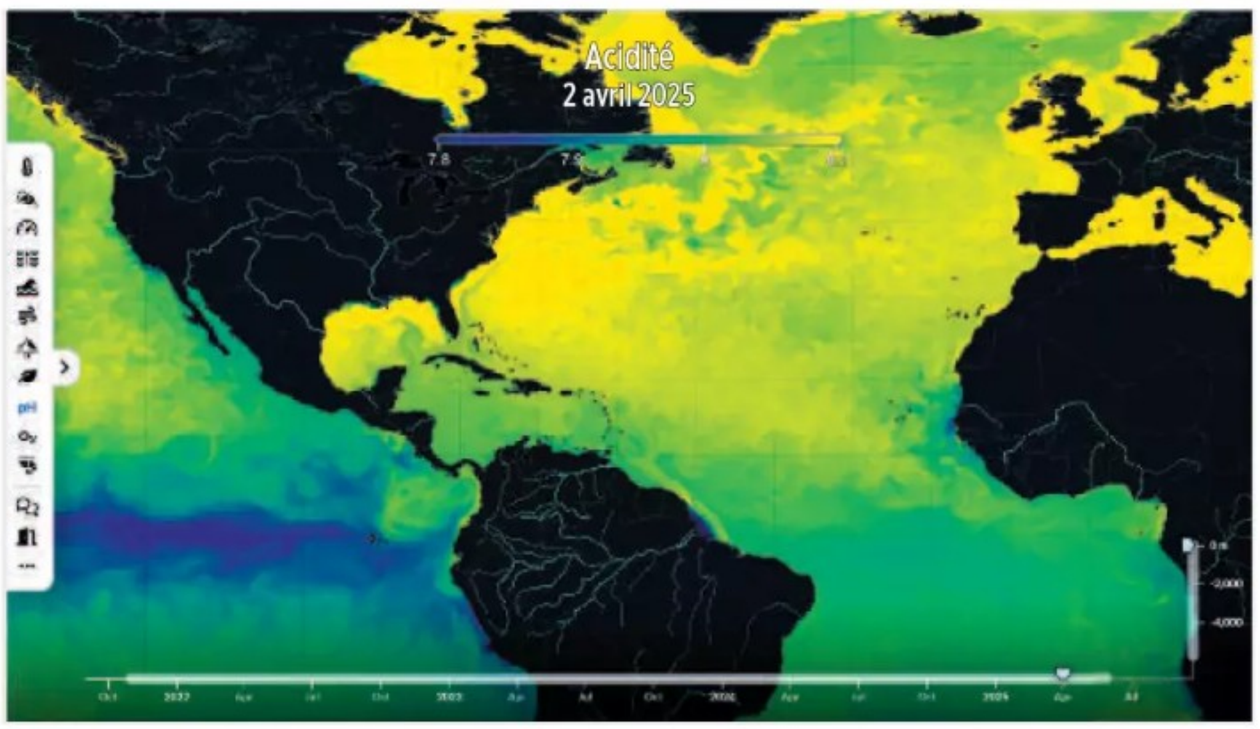
Éric Guilyardi, directeur de recherche CNRS au laboratoire Locean, Paris

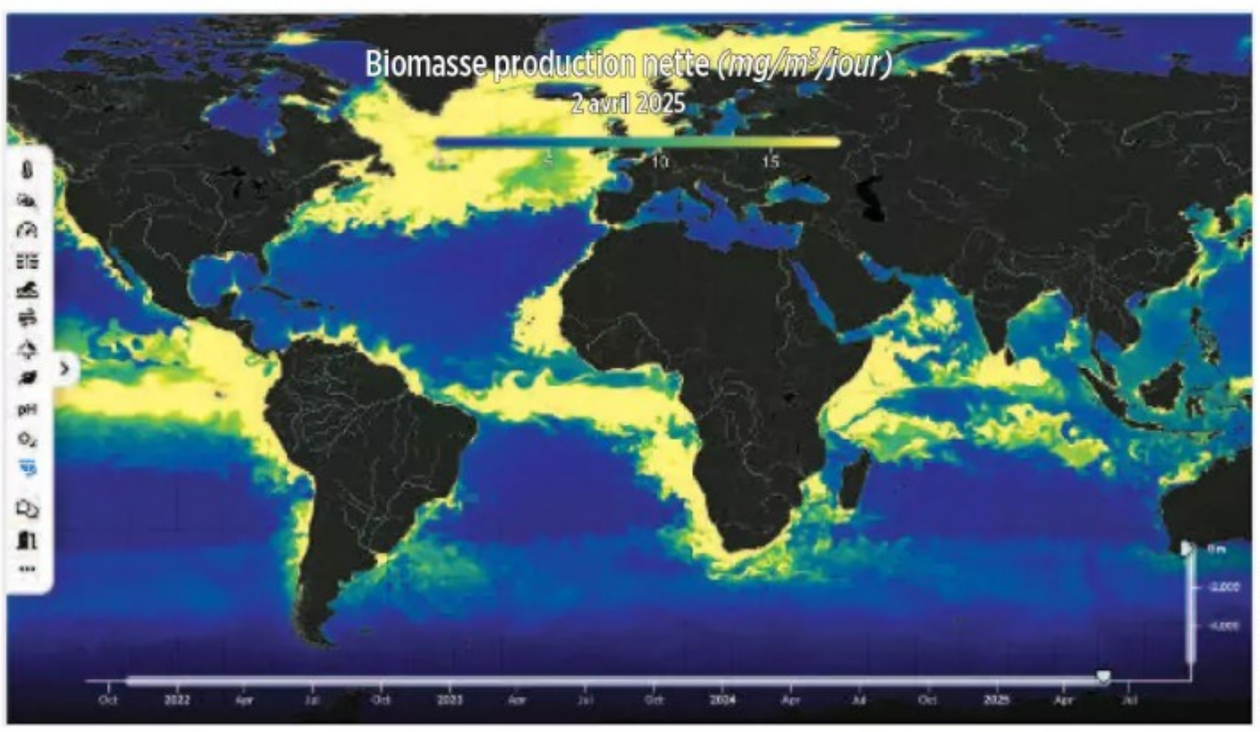
La France a la chance de posséder un témoin de cette évolution climatique : la grotte Cosquer, dont l'entrée est située à 37 mètres sous la surface de la Méditerranée, dans les calanques de Marseille. Il y a 20 000 ans, les humains qui en ornèrent les parois y accédaient par une plaine herbeuse située à 20 kilomètres de la mer. *« Les glaces recouvrent alors l'ensemble du Canada et le nord des États-Unis ainsi que la Scandinavie, la quasi-totalité des îles Britanniques et le Danemark*, rappelait Catherine Ritz, chercheuse à l'Institut des géosciences de l'environnement au sein de l'Université Grenoble-Alpes, lors du premier colloque scientifique consacré à l'art pariétal de la grotte Cosquer, en 2021. *Les Alpes, elles, sont couvertes d'une épaisse couche de glace dont seuls émergent les sommets les plus hauts. »* Ainsi, en Provence, le glacier de la Durance pousse ses moraines jusqu'à Sisteron.

Vers les pôles, les eaux se refroidissent, se salinisent et s'enfoncent

Selon la théorie de Milankovitch, la hausse des températures qu'a connue notre planète entre ce dernier maximum glaciaire et le début de notre actuelle ère géologique, l'Holocène, il y a 12 000 ans, s'explique par cette « danse » de la Terre et du Soleil : d'une part, la Terre s'est rapprochée de son étoile ; d'autre part, l'inclinaison de son axe de rotation et son obliquité – l'angle entre cet axe et le plan de son orbite autour du Soleil – ont favorisé le réchauffement. *« On assiste à partir de –5 000 à une rapide montée des eaux, de 40 à 50 millimètres par an, due à la fonte des grands inlandsis nord-américains et scandinaves, puis à un ralentissement, de 8 à 12 millimètres, entre –10 000 et –5 000, pour enfin atteindre une quasi-stagnation de 1 millimètre par an depuis 5 000 ans »*, explique Édouard Bard, professeur au Collège de France et chercheur au Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement, à Aix-en-Provence. Le volume de l'eau présente à la surface de la planète est constant. C'est son état qui change tout. À l'ère glaciaire, il pleut peu, car l'eau est emprisonnée sous forme de glace. Avec le réchauffement, son cycle s'accélère et baigne les continents de précipitations plus ou moins régulières. La plaine herbeuse et froide qui occupait les rives actuelles de la Méditerranée fait place à la vigne, au blé dur, aux garrigues et aux forêts de résineux des régions du sud de la France d'aujourd'hui. ◆◆◆







MERCATOR-OCEAN.EU

◆◆◆ Jusque dans les années 1990, les climatologues pensaient que les caractéristiques du climat provenaient avant tout des mouvements chaotiques de l'atmosphère, et non de l'océan. Cependant, toujours en avril dernier, Freddy Bouchet a rappelé à ses auditeurs le schéma théorique élaboré par Henry Stommel. En 1961, ce chercheur américain démontrait dans son laboratoire de Harvard qu'une eau salée et chaude dont la température baisse voit sa salinité augmenter. Il décrivait ainsi le principe d'un phénomène qui reste toujours difficile à mesurer : la circulation thermohaline, engendrée par les différences de densité des eaux de mer liées à leur température ou à leur teneur en sel. À l'approche des pôles, les eaux de l'océan se refroidissent, se salinisent et s'enfoncent dans les profondeurs. De la chaleur et des gaz de l'atmosphère, dont le très soluble dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre fauteur de la hausse des températures, sont ainsi soustraits de l'atmosphère.

Henry Stommel démontrait ainsi, le premier, l'importance du fonctionnement de l'océan dans la machinerie climatique. Il confortait aussi les intuitions de nombreux chercheurs, dont celles du Britannique James Lovelock, qui mit en évidence, dans les années 1950, le rôle primordial du sulfure de diméthyle, un composé soufré arraché par les vents à la surface des océans, servant de point de condensation à la vapeur d'eau et favorisant ainsi la formation de la pluie. Plus récemment, les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), créé en 1988, permettaient aux climatologues de prendre la mesure de l'effort nécessaire pour comprendre les interactions de l'océan avec l'atmosphère, son rôle dans l'absorption de la chaleur émise en excès par les activités humaines, mais aussi son effet bénéfique dans le cycle du carbone. Et en France, depuis le « mariage », dans les années 1990, du Laboratoire de métrologie dynamique (LMD) – qui travaille sur le fonctionnement de l'atmosphère – avec le Laboratoire d'océanographie et du climat (Locean), sous l'ombrelle de l'Institut Pierre-Simon Laplace, climatologues et océanologues ont appris à se comprendre. Auparavant, ils n'utilisaient pas les mêmes unités de mesure !

Modélisation. L'organisation Mercator Ocean produit des cartes interactives des océans en fonction de variables actualisées en temps réel (température, acidité, biomasse...). Couplées à l'intelligence artificielle, elles devraient faciliter la gouvernance des océans.

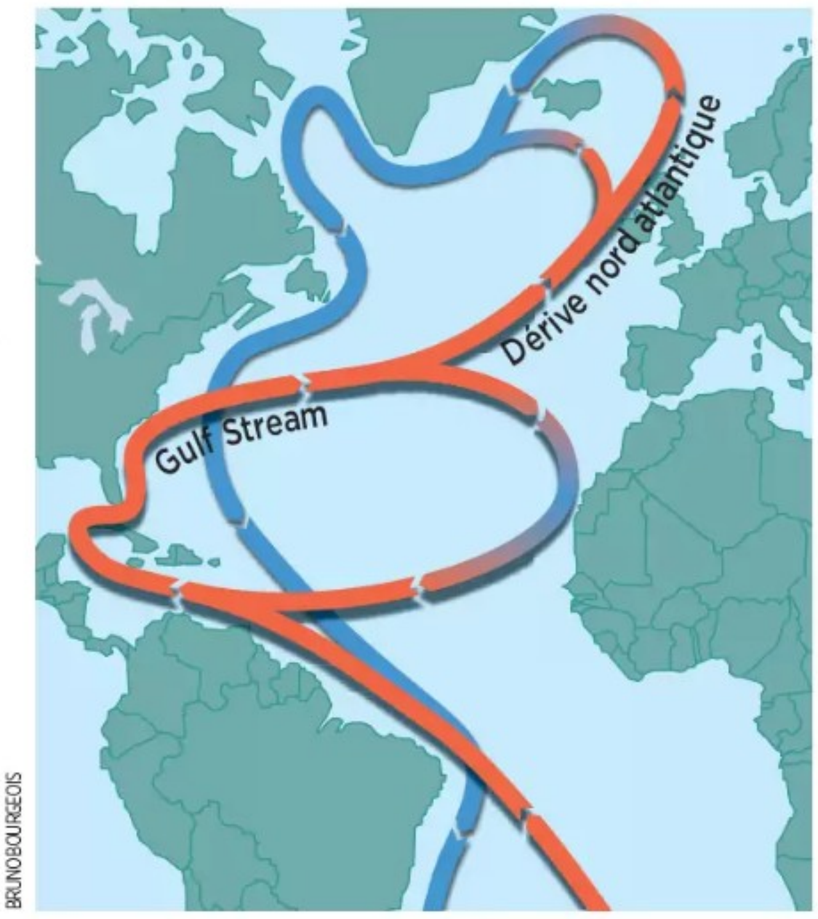
Des progrès rapides grâce aux bouées, sondes et radars

L'océan est une véritable éponge. Il pompe et stocke 93 % de l'excès de chaleur provoqué par les émissions de gaz à effet de serre. Ce rôle se double de celui de redistributeur de la chaleur depuis l'équateur vers les pôles et depuis la surface vers les profondeurs, ce qui façonne les contrastes régionaux et les variations du climat mondial dans le temps. *« Dans le couple formé avec l'atmosphère, l'océan est le partenaire lent, car il possède une forte inertie thermique :*

Bientôt une nouvelle ère glaciaire en France ?

En octobre dernier, 44 des meilleurs climatologues spécialistes des courants océaniques envoyaient aux ministres du Conseil nordique, qui réunit les États de la région arctique, une lettre d'avertissement. Ils les imploraient de prendre au sérieux le risque imminent d'un ralentissement, voire d'un arrêt de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (Amoc, en anglais). Ce sont en effet les conditions de vie de tout le bassin de cet océan qui pourraient devenir insupportables pour les humains, du fait d'un refroidissement important du climat local.

Mais qu'est-ce que l'Amoc ? Au départ, il y a le Gulf Stream, un courant chaud né dans le golfe du Mexique, créé par la rotation de la Terre, au débit équivalent à cent fois celui de l'Amazone. Il longe les côtes de la Floride avant de se désagréger en multiples tourbillons au large du cap Hatteras, en Caroline du Nord. 80 % de ces masses d'eau retournent vers le golfe du Mexique. Les 20 % restants constituent l'Amoc. C'est donc une circulation méridienne (du sud vers le nord) qui traverse le bassin atlantique pour se séparer en deux endroits, dans la mer d'Islande et au large de Terre-Neuve. L'Amoc transporte à partir des zones tropicales des quantités de chaleur estimées à un million de milliards de watts, ce qui représente à peu près 50 fois la consommation d'énergie de toute l'humanité depuis les origines. L'énergie solaire des tropiques est ainsi évacuée vers les zones septentrionales où le rayonnement est bien plus faible. Une énergie responsable du climat océanique doux dont bénéficie notamment la France.



Le circuit de courants chauds et froids que forme l'Amoc régule les précipitations et la température du globe, et pas seulement celles du bassin Atlantique.

En remontant vers le nord, les eaux délivrent leur chaleur au vent, se refroidissent et se chargent en salinité. Elles deviennent ainsi plus denses et plongent à environ 2000 à 3000 mètres de profondeur pour former un courant froid qui va retourner vers les tropiques. C'est le « retournement ». Ce que craignent les auteurs de la lettre, c'est que la fonte accélérée des glaciers du Groenland et de la glace des mers arctiques n'abaisse la salinité des eaux à ces latitudes, et donc leur densité et leur faculté à s'enfoncer dans les profondeurs. Car cette circulation dite « thermohaline » est mondiale. Si elle se ralentit, voire s'arrête, c'est le climat dans sa globalité qui sera modifié.

Selon les modélisations, le ralentissement de l'Amoc provoquerait un déplacement des précipitations tropicales vers le sud, affectant le régime des pluies de l'hémisphère Nord. En Afrique, les pluies seraient plus intenses dans la partie sud du continent et plus rares au Sahel et en Afrique de l'Est. En Asie du Sud, les moussons pourraient être moins prévisibles ou moins robustes, ce qui entraînerait des sécheresses plus fréquentes ou des inondations exacerbées lors des périodes de pluies intenses, compliquant la planification agricole et l'approvisionnement en eau de millions de personnes. L'Europe de l'Ouest, elle, pourrait ne plus bénéficier des apports en chaleur. Elle connaîtrait ainsi un climat beaucoup plus frais. Une conséquence paradoxale du réchauffement climatique.

ses deux à trois premiers mètres de profondeur contiennent autant de chaleur que les 80 kilomètres d'atmosphère qui le surplombent, expose Éric Guilyardi, directeur de recherche CNRS au Locean. *Comme il est profond de 4 000 mètres en moyenne, son inertie thermique est gigantesque, et en fait le véritable réservoir de chaleur de la machine climatique.* » Ainsi, la chaleur stockée l'été est restituée l'hiver, ce qui explique en partie le contraste climatique entre le climat doux de la Bretagne, qui le côtoie, et le climat continental de l'Alsace. L'influence peut être mondiale, ou presque, quand il s'agit du vaste océan Pacifique : *« Le phénomène El Niño représente un déstockage périodique de chaleur océanique tous les trois à sept ans, gouverné par le couplage entre océan et atmosphère et influencé par une panoplie de courants, d'ondes et de turbulences océaniques en interaction »*, décrivent Bruno Blanke et Casimir de Lavergne, chercheurs au CNRS, dans la revue de l'École polytechnique *La Jaune et la Rouge*.

Le fonctionnement intime de l'océan reste encore en partie mystérieux. Jusque dans les années 1950, les propriétés, sous la surface, de cette masse d'eau étaient complètement inconnues. Depuis, les progrès ont été extrêmement rapides grâce au déploiement de milliers d'instruments. À ce jour, 4 000 bouées flottent sur l'ensemble des mers du globe – il n'en ◆◆◆

◆◆◆ existait aucune en l'an 2000 – et sont capables de mesurer la température et la salinité de l'eau jusqu'à 2000 mètres de profondeur. Ce réseau, dénommé Argo, est l'instrument majeur permettant de suivre la captation de chaleur et de carbone par l'océan, grâce à ses instruments donnant la composition chimique des eaux. Par ailleurs, dans le sillage du programme World Ocean Circulation Experiment (Woce), mené dans les années 1990, la dizaine de pays possédant une flotte océanique scientifique conduit, tous les deux à cinq ans, des campagnes de mesures régulières par bathysondes – des sondes électroniques connectées aux navires de recherche, qui sillonnent régulièrement les mêmes routes. Non seulement elles enregistrent la température et la salinité, mais elles analysent des propriétés chimiques, comme les teneurs en oxygène dissous et en sels nutritifs (nitrate, phosphate, silicates). Les radars embarqués sur des satellites, comme Jason, Swot et Sentinel-1, renseignent sur l'état des courants, des vagues, des vents de surface et de la glace de mer, avec une précision de quelques centimètres. Les instruments optiques ou micro-ondes passifs qui équipent aussi ces satellites sont, eux, capables de fournir la concentration en chlorophylle et la turbidité, ce qui permet de suivre l'activité planctonique en temps réel. Enfin, les satellites fournissent une information précieuse : la topographie de la mer partout dans le monde.

Mercator Océan, spécialiste de l'océanographie numérique
www.mercator-ocean.eu

Laurent Bopp, Marina Lévy, *L'Océan en trente questions,* La Documentation française, 2025

Un jumeau numérique pour observer l'océan en continu

Aujourd'hui, des milliards de données enrichissent en permanence des modèles climatiques, affinant ainsi les scénarios d'évolution de l'océan. *« En une seule journée, l'ensemble des instruments de mesure fournissent l'équivalent de 2,7 milliards d'ouvrages écrits »*, illustre Pierre Bahurel, directeur général de Mercator Ocean. La mission de cette organisation privée à but non lucratif, créée il y a trente ans par dix institutions scientifiques européennes majeures et récemment convertie en organisation intergouvernementale, est de diffuser gratuitement les données collectées *(voir l'illustration p. 28)*. *« La masse d'informations dont nous disposons désormais est renouvelée presque en continu. Aussi avons-nous profité de la troisième conférence de l'ONU sur l'océan à Nice* [du 9 au 13 juin, ndlr] *pour lancer notre jumeau numérique des océans »*, se félicite Pierre Bahurel.

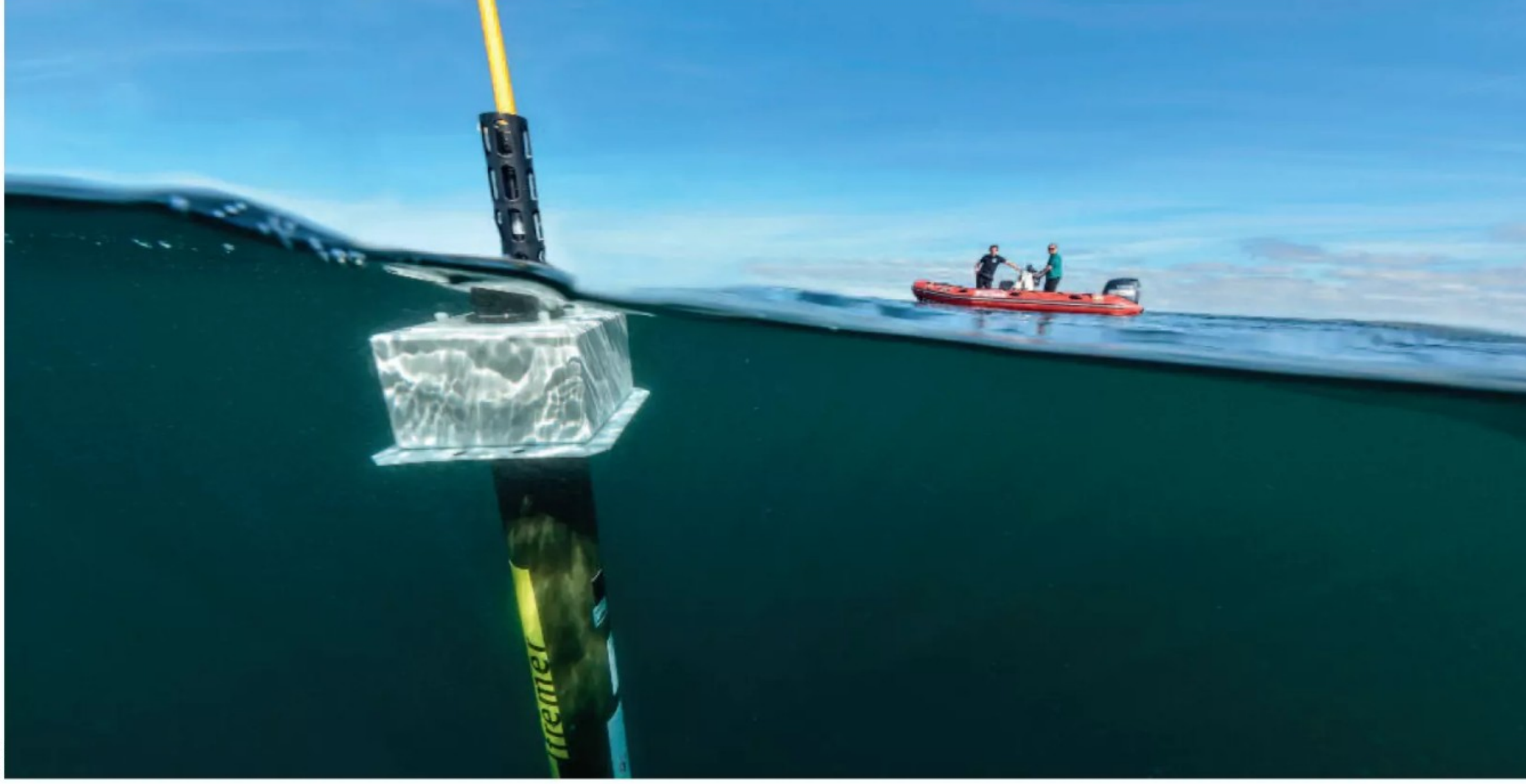
Plus d'acidité, c'est plus de dégâts sur la faune sous-marine

À force d'absorber du CO_2, l'océan s'acidifie. Cette « solvatation » du principal gaz à effet de serre produit en effet de l'acide carbonique, H_2CO_3, selon la formule $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$. Le Giec estime ainsi que les eaux de surface ont perdu de 0,017 à 0,027 unité de pH par décennie depuis la fin des années 1980, passant de 8,15 à 8,05 de 1950 à 2021 (le pH est neutre à 7, acide en dessous de 7, basique au-dessus). Cette acidification est beaucoup plus marquée dans les zones de remontée des eaux froides vers la surface, notamment dans les zones intertropicales et aux hautes latitudes. À la fin du siècle, l'océan pourrait ainsi connaître un pH moyen des eaux de surface de 7,9. Avec quelles conséquences ? De très nombreux organismes marins, comme les coraux et les mollusques, construisent un exosquelette en carbonate de calcium ou fabriquent une coquille. Avec un pH abaissé, cette minéralisation reste possible, mais devient plus coûteuse en énergie. Les organismes devront donc arbitrer entre le rôle protecteur assuré par la coquille et les autres fonctions vitales, croissance et reproduction.

ALEXIS ROSENFELD/ DIVERGENCE

Minéralisation. L'acidification des océans gêne la construction de l'exosquelette des coraux et peut conduire à leur blanchissement.

Les poissons seront également touchés. Les travaux menés notamment autour des sources hydrothermales ont démontré que l'acidité affectait leur système nerveux, diminuant leur capacité à contrer les prédateurs. Les scénarios climatiques les plus pessimistes prévoient que les eaux de mer des régions polaires, ainsi que du Pacifique Nord et de l'Atlantique Nord-Ouest, deviendront corrosives pour la plupart des organismes à coquille d'ici la fin du siècle.



IFREMER

Le profileur Arvor, petit robot autonome développé par l'Ifremer, permet de mesurer en temps réel la température et la salinité dans l'océan jusqu'à 2 000 mètres de profondeur. Il vise à étudier les évolutions climatiques.

Sur le web, il est désormais possible d'observer la respiration naturelle de l'océan, mais aussi l'impact de l'humain sur ce milieu. *« Le jumeau numérique croise en effet des données comme la température de l'eau, le niveau des océans, la vie planctonique via l'activité chlorophyllienne, mais aussi des informations comme le trafic maritime, les pollutions par les hydrocarbures, les algues invasives et même la pollution par les plastiques »*, énumère Fabrice Messal, responsable du projet à Mercator Ocean. Cette nouvelle ressource marque un véritable jalon dans l'histoire de l'océanographie : on a désormais atteint un niveau de connaissances suffisant pour avoir une vision globale de l'impact des pollutions anthropiques sur ces immensités. Le 6e rapport du Giec, remis en 2022, fournissait déjà des indicateurs alarmants sur l'impact du changement climatique sur l'océan. La température moyenne des eaux de surface a augmenté de 0,5 °C entre 1982 et 2023. Début avril 2023, à l'exception des eaux polaires, elle atteignait 21,1 °C, selon l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA), si bien que plus de 40 % de l'océan a été considéré comme touché par une « vague de chaleur marine ». La banquise arctique a perdu pour sa part 2,2 millions de kilomètres carrés de sa surface maximale entre 1979 et 2023. Et en quarante ans, le niveau de la mer a augmenté de 10,2 centimètres.

La pompe à carbone océanique, qui rend l'énorme service aux humains d'absorber un quart de leurs émissions de CO_2, est en train de s'enrayer. *« On estime que l'océan renferme 40 000 milliards de tonnes de CO_2, et il continue d'en capter tous les ans 2,5 milliards de tonnes supplémentaires »*, rappelle Marina Lévy, directrice de recherche au laboratoire Locean. Cette pompe fonctionne de deux manières. La première, c'est la circulation thermohaline. La seconde, c'est la captation par les micro-organismes marins qui flottent à la surface de l'océan. *« Cyanobactéries, picoflagellés, diatomées et autres coccolithophoridés assurent à eux seuls environ la moitié de la production primaire de biomasse de la planète, par photosynthèse du CO_2,* assure Marina Lévy. *Ils sont à la base de la chaîne alimentaire marine, ce qui fait qu'une partie de ce carbone est rejetée dans les profondeurs sous forme de déchets organiques – cadavres, particules fécales – et est ainsi isolée de l'atmosphère. »* Le puits océanique de carbone est passé d'une capacité d'absorption de près de 1 milliard de tonnes par an dans les années 1960 à environ 2,5 milliards aujourd'hui. Cette croissance est une réponse directe à l'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère, qui est donc plus abondant pour les organismes marins. Mais, durant cette même période, celle-ci a été bien plus rapide. C'est certain : l'océan piège moins efficacement le CO_2.

Cet affaiblissement du puits de carbone fait partie de la quinzaine de « points de bascule » du climat, tous dépendants du fonctionnement de l'océan. Certains d'entre eux sont visibles : la déforestation et la sécheresse en Amazonie, le blanchissement de la grande barrière de corail australienne, la disparition des glaciers continentaux et des calottes glaciaires. D'autres sont plus insidieux : le ralentissement des courants de la circulation océanique profonde, la fonte du permafrost arctique ou les variations de la mousson africaine. Le climat de demain sera profondément différent de celui d'aujourd'hui. Sans aucun espoir de retour. **LOÏC CHAUVEAU**

XAVIER BOYMOND

« EN UNE SEULE JOURNÉE, L'ENSEMBLE DES INSTRUMENTS DE MESURE FOURNISSENT L'ÉQUIVALENT DE 2,7 MILLIARDS D'OUVRAGES ÉCRITS »

Pierre Bahurel, directeur général de Mercator Ocean

LE FEU COUVE DANS LES FORÊTS ANIMALES

Victimes du réchauffement, du tourisme de masse et de la pêche, d'étonnants écosystèmes marins formés d'animaux – tels les gorgones ou les coraux – sont menacés. Comment pourront-ils résister ?

Créature mythologique à la chevelure de serpents, la gorgone glace le sang de ceux qui la regardent. Bien plus gracieuse, celle qui tapisse les fonds rocheux méditerranéens ravit les yeux. Lorsqu'elle se nourrit, étalant de délicates ramures, la gorgone rouge (*Paramuricea clavata*) exhibe à la surface de son squelette flexible des centaines de minuscules bouches, munies de huit tentacules urticants : ce sont des micro-organismes, les polypes. À l'image des méduses, leurs parentes éloignées, les polypes sont des animaux qui capturent leurs proies – du plancton et des particules en suspension – dans l'eau. Organisés en colonie, ils sont rarement seuls. Sur les branches des gorgones, un œil avisé dénichera des compagnons singuliers. Ici, la capsule blanche d'un œuf de requin roussette. Là, le corps poilu d'une araignée de mer. Là encore, le museau rubis d'un hippocampe pygmée. Et entre leurs éventails pouvant avoisiner le mètre, il n'est pas rare de voir se faufiler des poissons barbiers à la livrée orangée.

En Méditerranée occidentale, les gorgones rouges s'alignent, parallèles les unes aux autres, entre 10 et 200 mètres de profondeur. Lorsque la densité de leurs populations est suffisamment élevée, elles forment des massifs à l'allure proche de celle des forêts terrestres, dont elles partagent plusieurs fonctions écologiques. Car sous l'eau, les grands ensembles de gorgones offrent l'abri à une large quantité d'espèces, des poissons aux crustacés en passant par les invertébrés, et font office de nurserie. Ces caractéristiques valent à ces écosystèmes d'être présentés comme des « forêts animales marines » par les spécialistes.

Au-delà de 40 mètres, les gorgones semblent préservées des chaleurs marines

À l'instar d'autres animaux, les gorgones sont sensibles aux hausses des températures, et celles qu'a connues la Méditerranée en 2022 les ont massivement touchées. Cet été-là, *« les vagues de chaleur marine ont brûlé les forêts de gorgones rouges, décimant sur leur passage les communautés d'espèces qui en dépendaient »*, commente Lorenzo Bramanti, chercheur en écologie marine à l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer (Pyrénées-Orientales). Sur certains sites, elles ont été entièrement nécrosées : leur enveloppe colorée a disparu, laissant à nu un squelette rachitique et blanchâtre. Mortes. À 20 mètres de profondeur, la moitié de la surface du squelette au moins était nécrosée ; à 30 mètres, ce n'était plus que 20 %.

Les populations de gorgones du parc naturel du Montgrí, des îles Medes et du Baix Ter, au large de la Costa Brava (Espagne), se sont montrées jusqu'à présent résistantes à la chaleur. Cependant, selon une étude de l'université de Barcelone, les températures exceptionnelles de 2022 ont provoqué une surmortalité dans 70 % des colonies.

DANIELA PREISSLER-DIRSCHERL / WATERFRAME / BIOSPHOTO

Équipés de scaphandres autonomes, Lorenzo Bramanti et d'autres scientifiques ont étudié des peuplements situés plus en profondeur, entre 40 et 90 mètres. Leurs observations convergent : le taux de mortalité de *Paramuricea clavata* chute très rapidement au fur et à mesure de la descente, pour atteindre la valeur minimale de 5 %. *« Ce qui correspond à la mortalité habituelle lorsque la température de l'eau reste dans la normale, autour de 13 °C »*, indique l'écologue. Au-delà de 40 mètres, la zone mésophotique, dite aussi crépusculaire, semble préserver les gorgones des chaleurs marines. *« Ce refuge est un don des profondeurs »,* souligne le scientifique, qui précise toutefois que celui-ci n'est que *« temporaire et fonction de l'évolution du réchauffement climatique »*.

D'autant que les forêts sous-marines font face à d'autres pressions. Outre la pollution et le tourisme de masse, c'est la pêche qui menace les gorgones. Les ancres et les filets peuvent arracher les fragiles colonies ou les blesser. S'agissant de la pêche industrielle, l'ONG Bloom rappelle les ravages liés au chalutage profond. Depuis 2017, ce mode de pêche est interdit en Europe au-delà de 800 mètres de profondeur. Auparavant, *« pendant deux siècles, en raclant les fonds, les filets et les chaînes des chaluts ont pu, tels des bulldozers, raser librement les forêts animales marines »*, dénonce Raphaël Seguin, membre de l'association. Chaque année, les chalutiers français abrasent quelque 670 000 kilomètres carrés de fonds marins. Pour le militant, *« s'affranchir du chalut permettrait aux forêts de se régénérer, ce qui est impossible actuellement »*.

Le concept de forêt animale marine n'est pas nouveau. Il a été employé pour la première fois au XIXe siècle par le naturaliste anglais Alfred Wallace qui, décrivant les paysages marins de Malaisie, évoquait des *« fonds très irréguliers [...] avec de petites collines et des vallées, offrant une variété de stations pour la croissance des forêts animales »*. Une expression désignant les coraux qui dominaient les récifs.

« Lorsque, fixées au substrat, des espèces marines se déploient en trois dimensions et qu'elles sont suffisamment proches, elles ◆◆◆

Plongée scientifique pour découvrir les coraux d'eaux froides
sciav.fr/IfremerCoraux

Plateforme participative pour identifier des espèces des grands fonds
ocean-spy.ifremer.fr

◆◆◆ *constituent un habitat d'une complexité telle que les conditions écologiques varient localement*, explique Lorenzo Bramanti. *Il existe en son sein un microclimat propice au développement de la vie.* » Parmi les animaux susceptibles de créer de telles structures, on trouve donc les gorgones, mais aussi les coraux, les éponges et même les huîtres.

Dans le noir total, des coraux d'eaux froides colonisent le canyon de Lampaul

Dans le cadre de ses recherches, le biologiste étudie depuis quinze ans comment le concept de forêt animale marine peut être appliqué à la conservation des espèces. Son questionnement fondamental : selon quels critères scientifiques, inspirés de l'écologie forestière, peut-on affirmer qu'un écosystème marin remplit les fonctions d'une forêt ? L'objectif étant de préserver celle-ci plutôt que de protéger uniquement l'espèce architecte. Le concept suppose de définir, entre autres, la densité minimale que doit avoir la forêt aquatique et de vérifier si la notion de canopée – étage supérieur et protecteur de la forêt, où se développe une biodiversité spécifique – est respectée.

Pour répondre à ces questions, Lorenzo Bramanti codirige depuis 2021 le programme Deeplife qui vise, sur dix ans, à caractériser les forêts animales marines à travers le monde. S'appuyant sur les moyens techniques déployés par l'organisation Under the Pole, spécialisée dans les expéditions sous-marines, les scientifiques explorent la zone mésophotique.

ROBERTO RINALDI

« LES VAGUES DE CHALEUR MARINE ONT BRÛLÉ LES GORGONES ROUGES, DÉCIMANT SUR LEUR PASSAGE LES ESPÈCES QUI EN DÉPENDAIENT »

Lorenzo Bramanti, chercheur en écologie marine à l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer

Plus bas, dans le noir total, place aux coraux d'eau froide. Teintés de rose, ils colonisent par exemple les falaises du canyon de Lampaul, à 350 kilomètres au large de Brest. Ils y déploient leurs polypes entre 600 et 2 500 mètres de profondeur. À la différence des gorgones, leurs cousines, ces coraux durs possèdent des polypes munis de six tentacules. Comme les coraux tropicaux, ils forment des récifs grâce à l'empilement de leurs squelettes calcaires. Ce canyon a été défini comme « zone atelier » par l'Ifremer, qui cherche à comprendre le fonctionnement de cet écosystème profond.

Depuis 2021, plusieurs capteurs autonomes, posés à 780 mètres de profondeur, mesurent en continu des paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH et la turbidité. Leurs informations sont relevées annuellement. À côté de cet observatoire, une caméra filme un jardin de corail où pousse l'espèce *Madrepora oculata*. *« L'œil de la caméra zoome par intermittence sur les polypes pour enregistrer le déploiement des tentacules lorsqu'ils se nourrissent, ou leur contraction lors d'une perturbation, l'interaction avec un autre animal par exemple,* relate Julie Tourolle, ingénieure à l'Ifremer. *Grâce à ce suivi, nous espérons évaluer le rythme biologique des coraux.* » Des plans larges renseignent les chercheurs sur la biodiversité qui s'épanouit à cet endroit, illustrée entre autres par des crabes, huîtres, éponges, poissons et poulpes Dumbo.

Lors de campagnes hauturières, des robots ont pris des clichés des falaises de Lampaul

FRANCK GAZZOLA/UNDER THE POLE/ZEPPELIN NETWORK

Pour étudier les coraux profonds, une équipe d'Under the Pole, organisation de protection des océans, a effectué un millier de plongées, dans le cadre d'une campagne menée de 2017 à 2020 en Polynésie française. Ici, deux chercheurs en recueillent à 40 mètres de fond.

afin d'en reconstituer la cartographie au centimètre près. Des expériences ont été réalisées *in situ* pour voir à quelle vitesse les coraux grandissent. L'ensemble de ces données est en cours d'analyse.

Réchauffement climatique et acidification exercent deux pressions opposées

Comme les écosystèmes superficiels, les forêts sous-marines profondes sont menacées par les pressions humaines, dont le chalutage et les pollutions. Quelles sont leurs capacités de résilience face aux changements globaux ? *« Les coraux d'eau froide vont être pris en tenaille entre le réchauffement climatique, qui les poussera à migrer vers le fond pour trouver de la fraîcheur, et l'acidification de l'océan, qui aura l'effet inverse »*, explique Lénaïck Menot, chercheur en écologie des fonds marins à l'Ifremer.

Mesurée en mer d'Irminger (sud-est du Groenland) en 2016, l'acidification des eaux profondes de l'Atlantique Nord consécutive à celle des eaux de surface polaires arctiques est en cours. Or, qui dit acidité dit raréfaction des ions carbonates disponibles pour former les squelettes de coraux, ou dissolution de ces derniers. Ainsi, d'après une analyse publiée dans la revue *Nature* en 2018, les coraux bâtisseurs verraient leur espace de vie en profondeur se réduire d'au moins 1 000 mètres en raison de l'acidification à venir dans les trente prochaines années. Pour savoir si les coraux de Lampaul pourraient s'adapter aux différents changements, des boutures de l'espèce *Desmophyllum pertusum* ont été prélevées en 2024 puis transférées dans des aquariums pressurisés, de sorte à reproduire leur environnement d'origine. Là, elles ont été exposées pendant quatre mois à une température et à un niveau d'acidité similaires à ceux attendus à l'horizon 2100 (selon un scénario basé sur une élévation de 3 °C de la température de l'eau et une diminution du pH de 0,3 unité). Dans ces conditions extrêmes, on observe une nécrose totale du tissu entourant le squelette de l'animal, ce dernier commençant par ailleurs à se dégrader.

Ces premiers résultats, qui doivent être complétés par des informations sur le microbiome du corail – c'est-à-dire les communautés bactériennes qui lui sont associées – ne sont pas généralisables. La capacité de résilience des coraux dépend aussi *« de paramètres locaux, comme l'oxygène dissous et les apports en nourriture,* ponctue Lénaïck Menot. *Et de la nature de la population de corail considérée »*.

CAROLINE DEPECKER

Des puits de carbone au fond des mers

Socles d'écosystèmes variés, les forêts sous-marines qui, à travers leurs structures en trois dimensions, servent d'habitat à une grande diversité d'espèces, peuvent aussi être végétales. On peut citer à ce titre, en Méditerranée, les herbiers de posidonies, plus connus sous le nom de prairies marines en raison de leur apparence : de vastes étendues de minces rubans verts serrés, qui correspondent aux feuilles de cette plante à fleurs. D'autres forêts, fréquentes en mer d'Iroise, sont formées par les laminaires, de grandes algues brunes qui atteignent facilement les quatre mètres. Elles peuvent être géantes et avoisiner la trentaine de mètres, comme en Californie, constituant alors des peuplements baptisés couramment forêts de kelp.

Point commun de ces ensembles ? Grâce à la photosynthèse, ce sont d'importants puits de carbone. Un herbier de posidonies stockerait ainsi jusqu'à 700 tonnes de carbone par hectare, soit sept fois plus qu'une forêt de feuillus française. Voilà pourquoi les forêts végétales ne peuplent que les eaux superficielles, là où les rayons du soleil peuvent pénétrer. Autre service rendu par ces écosystèmes : la protection du littoral. Les mangroves, présentes dans les zones d'estran tropicales sont exemplaires à ce titre. Avec de grandes échasses en guise de racines, elles stabilisent les sédiments et réduisent l'érosion côtière.

GETTY IMAGES

Une place au soleil. Les forêts végétales sous-marines recherchent la lumière (ici en Californie).

La Méditerranée, future mer tropicale

Semi-fermée, peu profonde, la Méditerranée est un laboratoire de l'évolution future des océans. Or elle étouffe déjà sous les canicules marines et les invasions d'espèces non natives.

L'an dernier, la mer Méditerranée a battu de nouveaux records de chaleur : 29,4 °C dans la rade de Villefranche-sur-Mer (Alpes-Maritimes) à la mi-août, plus de 30 °C au large de la Grèce, de la Sicile ou de la Corse. La fréquence et l'intensité de ces canicules marines – qui se caractérisent par des températures de surface médianes supérieures de cinq degrés aux normales climatiques pendant au moins cinq jours consécutifs, et affectent tous les océans – ont doublé depuis les années 1980, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec). Et si les mers sont soumises à de multiples facteurs de stress qu'il est difficile de hiérarchiser, en Méditerranée, *« cet emballement des vagues de chaleur extrêmes est probablement la principale menace qui pèse sur les écosystèmes marins »*, alerte Jean-Pierre Gattuso, directeur de recherches au Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer (CNRS-Sorbonne Université). *« Elles provoquent des mortalités massives d'espèces végétales et animales, comme les gorgones, les oursins, les étoiles de mer et certains mollusques »*, poursuit le chercheur. Les forêts de posidonies, ces longues herbes vertes qui tapissent les fonds sableux, protègent les poissons juvéniles des prédateurs et séquestrent le carbone, figurent, elles aussi, parmi les victimes de ces « incendies » sous-marins *(lire aussi p. 32 à 35)*.

Cette température marine qui augmente plus vite qu'ailleurs dans le monde provoque une mutation profonde – climatique, biologique et paysagère : la « tropicalisation » transforme en effet les écosystèmes marins, et a déjà des effets durables sur le climat, l'économie et l'habitabilité du bassin méditerranéen. *« Même les hivers sont devenus très doux »*, souligne Guillaume Marchessaux, chercheur à l'Institut pour la recherche et le développement (IRD) au sein de l'Institut méditerranéen d'océanologie (MIO) de Marseille. Dans cette mer semi-fermée et peu profonde, on observe *« une forte accélération des phénomènes liés à l'impact humain et aux espèces invasives »*, poursuit l'océanographe. De sorte qu'on peut voir en elle une sentinelle du changement climatique dans les océans.

Représentant seulement 1 % des eaux marines de la planète, la Grande Bleue abrite plus de 8 % de la biodiversité mondiale – 17 000 espèces, dont un quart sont endémiques, comme la posidonie, le mérou brun et la grande nacre. Chaque année, plus de 50 000 navires la parcourent, soit autant de vecteurs d'introduction d'espèces non natives via les eaux de ballast ou les coques. Connecteur artificiel avec la mer Rouge, le canal de Suez offre un corridor aux espèces tropicales, qui trouvent désormais en Méditerranée des conditions favorables à leur expansion et peuvent supplanter les espèces autochtones.

GIANCARLO BELLISSIMO

Rugulopteryx okamurae modifie totalement le milieu où elle s'installe.

L'algue brune qui ravage la Grande Bleue

Rugulopteryx okamurae, une algue brune venue d'Asie, colonise le littoral marseillais depuis une dizaine d'années. Elle a été introduite dans l'étang de Thau (Hérault) au début des années 2000, via des naissains d'huîtres importés du Japon, avant d'atteindre la calanque de Callelongue (Bouches-du-Rhône) en 2016, probablement collée à un oursin consommé puis rejeté à la mer. On la retrouve ensuite en Espagne, au Maroc, aux Açores, au Cap-Vert, en Sicile ou encore en Algérie… Son emprise est ravageuse. Elle est d'ailleurs qualifiée d'espèce « transformeuse », car elle modifie radicalement son milieu : une fois installée, elle tapisse les récifs sous-marins jusqu'à 40 mètres de profondeur, étouffant toute autre forme de vie. Des fragments, détachés par les vagues et les courants, sédimentent sur le fond marin et peuvent obstruer les filets de pêche, ou s'échouer sur les plages. Ils s'y décomposent en formant des amas qui, en pourrissant, dégagent du sulfure d'hydrogène nocif. **E. P.**

JACQUELYN MARTIN/AP/SIPA

« Terminator ». Insatiable, agressif, le crabe bleu, qui prolifère en Méditerranée depuis bientôt dix ans, n'a pas usurpé son surnom !

Sur plus de mille espèces animales et végétales non natives recensées à ce jour, *« seules 10 % sont considérées comme invasives »*, indique Guillaume Marchessaux. Soit une centaine – aux effets pourtant massifs car ces espèces sont dotées de *« capacités biologiques assurant leur expansion et leur domination : un taux de reproduction extrêmement élevé, un taux de croissance larvaire important, une grande capacité de colonisation de nouvelles zones, ainsi qu'un régime omnivore ou avec peu de préférences alimentaires »*.

Parmi ces voraces, le poisson-lion (*Pterois volitans*) – ou rascasse volante – venimeux et urticant, gobe poissons et crustacés. Redoutable envahisseur lui aussi, le poisson-ballon (*Lagocephalus sceleratus*) – ainsi nommé car il peut, en cas de menace, se gonfler par ingestion rapide d'eau – avale aussi bien des oursins que des coquillages ou des poissons. Sa chair est toxique, et son bec si puissant qu'il déchire les filets de pêche et sectionne les doigts des pêcheurs et nageurs. Herbivore, le poisson-lapin (*Siganus rivulatus*) est quant à lui une vraie calamité pour les herbiers et algues de Méditerranée, tondus par ces brouteurs insatiables qui se déplacent en bancs de centaines ou milliers d'individus. *« Dans leur écosystème d'origine,* précise Guillaume Marchessaux, *ces populations sont limitées par des parasites et des prédateurs qui ont coévolué avec elles sur des milliers d'années. Mais en Méditerranée, elles n'ont pas de prédateurs car les espèces endémiques ne mangent pas une espèce inconnue. »*

Une seule espèce peut déséquilibrer tout un écosystème

Ainsi, le crabe bleu (*Callinectes sapidus*), originaire de la côte est de l'Amérique et surnommé « Terminator » tant il est agressif, a un prédateur naturel – le poulpe – dans son milieu d'origine. En Méditerranée, où il a été repéré dans les années 1950, il prospère sans ennemi. Sa population a explosé au large de la Tunisie et de la Sicile en 2017-2019, puis en France en 2021, et l'année suivante dans l'Adriatique. Cet excellent nageur, qui a une extraordinaire capacité de reproduction – jusqu'à 2 millions d'œufs par ponte ! –, dévore tout ce qui passe à sa portée… même ses congénères ! Avec ses pinces puissantes, il sectionne les filets des pêcheurs. *« Comme la plupart des espèces invasives, il est capable de tolérer de larges gammes de températures : 24 °C est son optimum, mais il ne meurt qu'à 40 °C »*, explique le chercheur du MIO.

Confrontées à cette « machine de guerre », les espèces natives – comme le petit crabe vert (*Carcinus maenas*) – n'ont aucune chance… *« Le crabe bleu nous prouve qu'une seule espèce peut déséquilibrer tout un écosystème*, constate Guillaume Marchessaux. *On ne pourra jamais l'éradiquer. À terre, on peut confiner une espèce invasive avec des clôtures, procéder à des arrachages. En mer, c'est impossible. »* Pourtant, un jour devrait venir où les populations se feront beaucoup moins denses. C'est ce qui s'est produit avec *Caulerpa taxifolia*, algue tropicale apparue au large de Monaco dans les années 1980. Elle a asphyxié la Méditerranée avant de régresser naturellement depuis dix ans.

En attendant, prévient l'océanographe, *« nous devons agir pour éviter les pertes irréversibles pour la biodiversité et limiter l'impact socio-économique, notamment sur la pêche artisanale »*.

Seule option aujourd'hui, selon lui : passer le crustacé à la casserole. *« La chair du crabe bleu se rapproche de celle du tourteau ou de la langouste. On pourrait prélever des centaines de kilos d'individus, ce qui permettrait de réduire la population tout en compensant les pertes subies par les pêcheurs. »* Reste à développer *« un circuit court local, limité dans le temps, pour une pêche de contrôle et non d'exploitation »*, propose Guillaume Marchessaux. Une solution transposable à d'autres espèces invasives… à condition qu'elles soient comestibles et aussi savoureuses.

ÉLIANE PATRIARCA

G. MARCHESSAUX

« EN MÉDITERRANÉE, LES ANIMAUX ET VÉGÉTAUX NON NATIFS PROSPÈRENT CAR LES ESPÈCES ENDÉMIQUES NE MANGENT PAS UNE ESPÈCE INCONNUE »

Guillaume Marchessaux, chercheur IRD à l'Institut méditerranéen d'océanologie, Marseille

À ROSCOFF, CAP SUR L'INFINIMENT PETIT

Depuis cent cinquante ans, chercheuses et chercheurs de l'un des plus grands centres de biologie européens documentent la vie marine et ouvrent des pistes d'avenir. Objets d'étude privilégiés du moment : les communautés microbiennes et les algues. Reportage.

En ce lendemain de Pâques, c'est un ballet bien réglé qui se déroule aux abords du *Néomysis*. Nul besoin de se parler pour savoir qui porte quoi, ou décider ce dont on aura besoin sur le bateau : Fabienne Rigaut-Jalabert, Romain Crec'Hriou et Sarah Bureau sortent en mer deux fois par mois. L'ambiance n'est pas à la flânerie : ici, on bosse. Les trois ingénieurs de recherche appartiennent au Service d'observation et d'accès aux ressources marines de la Station biologique de Roscoff (Finistère). Leur principale mission : prendre le pouls chimique et biologique de la Manche. C'est pourquoi ils feront des mesures à deux endroits – juste à la sortie du port (à 500 mètres de la corniche) et à 2,5 milles au large. *« Le premier est le point de mesure historique. Le suivi des paramètres physico-chimiques y est continu depuis 1996 »*, précise Fabienne Rigaut-Jalabert. Mais, avec le port tout proche et ses ferrys qui chargent les voya-

geurs à destination de Plymouth (Royaume-Uni), il est difficile de savoir ce qu'on capte. Depuis les années 2000, la plupart des prélèvements ont donc lieu au nord-est de l'île de Batz, juste en face de Roscoff.

Sarah Bureau est chimiste. Elle mesure la salinité, les taux de nitrites, de nitrates, la température de l'eau… En tout, elle surveille 15 paramètres. Romain Crec'Hriou, quant à lui, se concentre sur le zooplancton, la masse d'animaux (crustacés, méduses, larves…) en suspension qui sont déplacés dans le courant marin sans pouvoir s'en échapper. Il tire un grand filet conique de deux mètres de long et 60 centimètres de diamètre, et dont le maillage est de 200 micromètres. À l'aide d'un système ingénieux de poids, le filet est envoyé à 50 mètres de profondeur. Et il revient chargé de petits points brun clair visibles à l'œil nu, signe que la récolte est bonne. Enfin, c'est au tour de Fabienne Rigaut-Jalabert de tirer un trait, autrement dit lancer son filet, dont les mailles mesurent 20 micromètres. Elle est la spécialiste du phytoplancton, c'est-à-dire de la part végétale du plancton, qui inclut les micro-algues mais aussi les bactéries photosynthétiques. Son échantillon contient ce qu'on appelle le microbiome océanique libre, la masse de microbes – organismes unicellulaires et virus – qui peuplent les mers. On estime qu'ils représentent les deux tiers de la biomasse océanique, et ils intéressent de plus en plus la recherche scientifique.

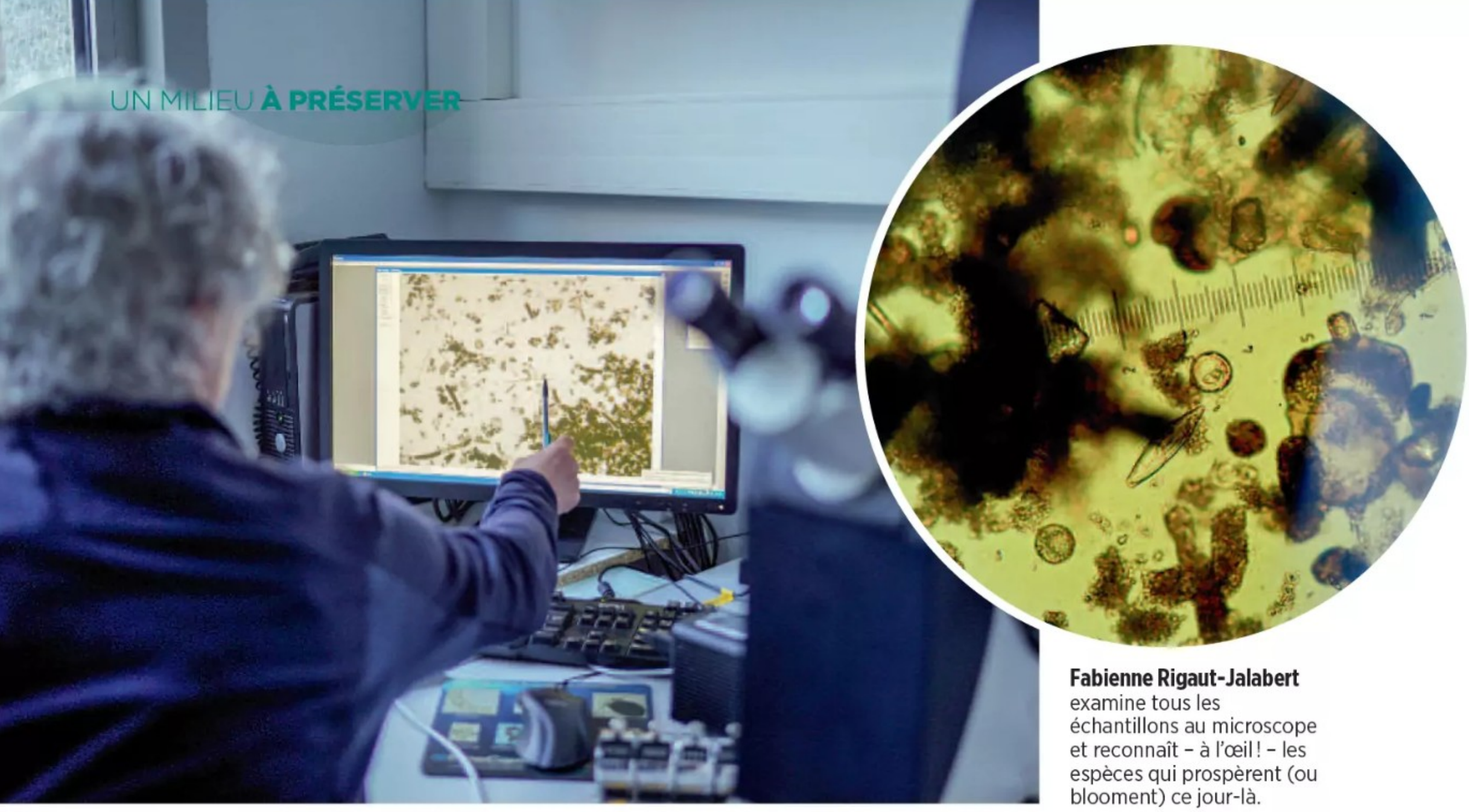
À bord du *Néomysis*, l'équipage scientifique de la Station biologique de Roscoff (Finistère) échantillonne l'eau, le zooplancton et le phytoplancton tous les quinze jours. Une surveillance de la Manche et de son microbiome qui s'inscrit dans un réseau d'observation du littoral français.

Dotés de maillages différents, plusieurs filets sont lancés à des profondeurs variables.

Fabienne Rigaut-Jalabert, spécialiste des micro-algues, conditionne les échantillons qu'elle analysera plus tard en laboratoire.

Pour sa récolte, Fabienne Rigaut-Jalabert tire un trait juste sous la surface. *« Les eaux sont tellement brassées ici que la colonne d'eau* [le volume d'eau compris entre le fond et la surface, ndlr] *est homogène pour la répartition des micro-organismes. Avec une profondeur de 60 mètres, je peux me contenter d'échantillonner à un mètre sous la surface »*, précise l'ingénieure de recherche. Ce jour-là, elle espère trouver des diatomées, majoritaires dans ces eaux riches. Quinze jours plus tôt, ces micro-algues enveloppées par une cuirasse de silice avaient connu un bloom (ou efflorescence), c'est-à-dire une hausse brutale de leur densité. Mais quand le filet remonte et que Fabienne en transvase le contenu dans un flacon en plastique, elle est sceptique : *« C'est beaucoup trop clair. Il n'y a pas grand-chose… le zooplancton a tout mangé. »* Son intuition sera confirmée quelques heures plus tard, de retour au laboratoire : sous son microscope, on pourra voir des « brouteurs » entre des débris de micro-algues, à savoir des groseilles de mer, de très petites méduses de la famille des *Pleurobrachia*.

Sur le bateau, elle n'en néglige pas pour autant le conditionnement des échantillons qui seront analysés sur la terre ferme : certains sont mélangés avec un fixateur pour la ◆◆◆



Fabienne Rigaut-Jalabert examine tous les échantillons au microscope et reconnaît – à l'œil ! – les espèces qui prospèrent (ou bloom) ce jour-là.

◆◆◆ microscopie ; d'autres congelés immédiatement pour être dénombrés en cytométrie de flux. Maîtriser la pipette, même avec le roulis du bateau, est une compétence de base pour l'équipe. *« Aujourd'hui, il fait très beau, mais parfois, la sortie est vraiment difficile »*, reconnaît Fabienne Rigaut-Jalabert. Seules des conditions de navigation dangereuses peuvent décaler une sortie en mer. Observer la mer au nom de la science est un sacerdoce.

À la frontière entre espèces du Nord et du Sud, Roscoff est un hotspot de biodiversité

Le check-up bimensuel alimente le réseau du Service d'observation en milieu littoral du CNRS. Désormais, 25 sites de mesure sondent les mers et océans de la planète selon des protocoles standardisés. *« Nos mesures s'inscrivent dans le temps long. Cela nous permet de voir les tendances »*, précise la chercheuse. Pour les phytoplanctons, avec une mesure tous les 15 jours, il est possible de manquer un bloom, mais la fréquence est suffisante pour observer les cycles décennaux, voire, demain, documenter les changements à plus grande échelle. Au fur et à mesure des besoins de la science, de nouveaux dosages et captations peuvent renforcer l'arsenal de mesures. Ainsi, le zooplancton n'est contrôlé que depuis trois ans.

Après deux heures de navigation, les scientifiques et leurs échantillons rentrent au port. Roscoff héberge un des plus grands centres de biologie marine d'Europe. Petit bout de Paris en Finistère, la Station biologique est placée sous la double tutelle de Sorbonne Université et du CNRS. On la doit à Henri de Lacaze-Duthiers, professeur à la Sorbonne et pionnier de la zoologie marine. En 1872, concrétisant son envie de ne pas réduire son étude à des échantillons morts et conservés dans le formol, il crée à Roscoff, au plus près de la mer, un laboratoire de zoologie expérimentale. Plus de 150 ans plus tard, d'autres disciplines y côtoient la zoologie, le CNRS s'est joint à l'aventure (en 1946), et quelque 200 chercheurs, ingénieurs et techniciens y travaillent en permanence.

Il faut le reconnaître, Roscoff a de nombreux avantages… Non seulement la vue sur l'île de Batz est splendide, mais le site propose une grande diversité de milieux à proximité : des rochers, du sable, de la vase, des estuaires… *« Les marées basses à fort coefficient ont toujours lieu au milieu de la journée. Cela simplifie beaucoup l'accès aux espèces des fonds marins. C'était un avantage décisif dans les débuts de la station »*, raconte Fabrice Not, directeur de recherche CNRS et spécialiste des micro-algues, depuis son bureau avec vue sur la mer. En outre, par sa situation, Roscoff est un hotspot (point chaud) de biodiversité, à la frontière entre espèces du Nord (Manche, mer du Nord) et du Sud (Atlantique).

Microbiome marin : le peuple invisible de l'océan, conférence de l'Espace des sciences à Rennes, sciav.fr/PeupleOcean

Roscoff : les vigies du monde marin, série « Va savoir » #10, CNRS sciav.fr/VigieMarin

Fabrice Not, *La Station biologique de Roscoff, au cœur des sciences marines,* Locus Solus, 2022

BERNARD MARTINEZ

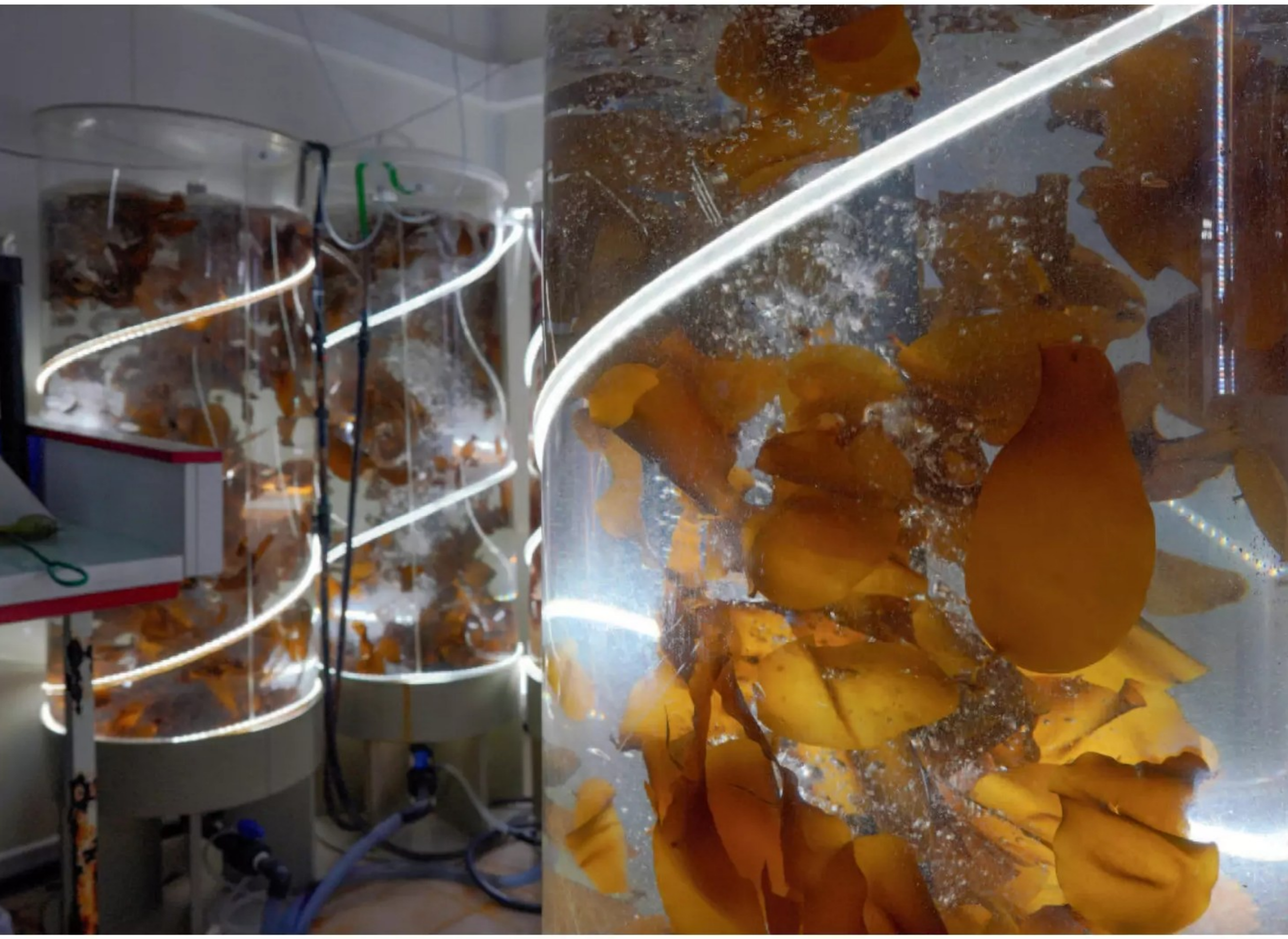
« TOUT ORGANISME EST UN MINI-ÉCOSYSTÈME. MÊME LES ALGUES ONT UNE COMMUNAUTÉ DE MICRO-ORGANISMES ASSOCIÉE »

Fabrice Not, directeur de recherche CNRS à la Station biologique de Roscoff

À première vue, les laboratoires n'ont rien d'inhabituel : automates de PCR – ces machines d'amplification de l'ADN souvent utilisées pour identifier les espèces –, réfrigérateurs à échantillons, boîtes de tubes d'analyse, paillasses… Mais ici, l'eau de mer coule au robinet, *« et revient à la mer après un passage dans un système de filtration,* précise Fabrice Not. *Il est très important pour les équipes de ne pas polluer ».* Jour après jour, la station constate l'impact des activités humaines sur les milieux marins. Comme en mars 1978, quand ses équipes ont mesuré en direct la disparition de petits crustacés (amphipodes de la famille *Ampelisca*) de l'estuaire breton à la suite de l'échouage de l'*Amoco Cadiz* et de la marée noire qui en a résulté.

Mais l'observation des milieux marins ne sert pas seulement à documenter les ravages des activités humaines sur la biodiversité. Elle est évidemment cruciale pour étudier le mode de vie des espèces qui la composent. Car à bas bruit, et à l'échelle microscopique, l'écologie marine subit une révolution conceptuelle. Contrairement à ce que suggèrent les ouvrages anciens de la bibliothèque, on ne peut plus considérer un organisme sans prendre en compte la foultitude d'espèces qui lui sont associées. *« Aucun organisme n'est isolé,* souligne Fabrice Not. *Chacun – humain, roussette ou étoile de mer – abrite un microbiote sans lequel il ne peut survivre. »* Cette idée est résumée par le terme « holobionte », du grec *holo,* ◆◆◆

Des macro-algues aux virus, la station biologique s'intéresse à tous les organismes marins et à leurs interactions. Ces grands aquariums pourraient bientôt permettre d'étudier le microbiome des algues brunes et son effet face au changement climatique.



◆◆◆ (« tout ») et *bios* (« vie »). Fabrice Not est clair : *« C'est un changement de paradigme. Chaque organisme est un mini-écosystème en soi. »* Ainsi, non seulement l'océan héberge un microbiome libre, mais chaque espèce a son propre microbiome associé – une flore ou un ensemble de micro-organismes (virus, bactéries, micro-algues…) qui interagissent. C'est en considérant que l'organisme et son microbiome sont indissociables que les scientifiques ont développé le concept d'holobionte. *« Même les algues, micro ou macro, ont une communauté de micro-organismes associée. On parle alors de phytosphère »*, poursuit le spécialiste. Cette vision nouvelle conduit à un changement des pratiques. *« Pendant longtemps, les espèces de micro-algues cultivées en laboratoire subissaient un traitement pour éradiquer les bactéries périphériques : l'axénisation. Désormais, on réalise que, pour un grand nombre d'espèces, ce microbiome est indispensable à leur culture »*, raconte Priscillia Gourvil, responsable de la Roscoff Culture Collection. Cette banque de ressources biologiques marines, l'une des plus riches au monde, comprend plus de 11 000 souches d'organismes marins – micro-algues, macro-algues, bactéries, virus… C'est là qu'auraient été conservés les échantillons de Fabienne Rigaut-Jalabert… si elle y avait trouvé des éléments intéressants.

La collection de Roscoff, sous la responsabilité de Priscillia Gourvil, est l'une des plus importantes au monde en matière de micro-algues. Dans des salles et incubateurs à 4, 13, 20, 22 ou 25 °C, on cultive des souches de tous les milieux et tous les climats pour fournir la recherche internationale en matériel biologique.

La collection est régulièrement complétée par des échantillons de toutes les zones océaniques (ainsi que de quelques souches vivant en eau douce). *« Ils y entrent à l'occasion des campagnes océanographiques »*, précise Priscillia Gourvil. Ils sont analysés par PCR. S'ils contiennent des espèces intéressantes, celles-ci sont isolées au microscope pour être mises en culture – dans une pièce à 4 °C pour les échantillons polaires, à 13 °C pour ceux récoltés à Roscoff par exemple, à 20 °C pour les souches méditerranéennes, voire dans un incubateur à 22 °C ou 25 °C pour les espèces tropicales. Pour les espèces photosynthétiques, qui ont besoin de lumière, il s'agit de trouver la bonne longueur d'onde : les lampes sont parfois munies de filtres rouges pour ralentir la croissance ou bleus lorsque les spécimens viennent des profondeurs et ne sont pas habitués aux lumières fortes. *« Il ne*

faut pas que nos cultures poussent trop vite », explique Priscillia Gourvil. Pour la spécialiste, il s'agit de trouver les conditions parfaites pour que les cultures restent assez actives – pour se maintenir en bonne santé –, sans pour autant s'épuiser. Tous les échantillons reçus sont aussi congelés, par sécurité. La station biologique a ainsi développé une compétence forte en matière de culture des micro et macro-algues.

La station vend certaines de ses souches, mais pas à n'importe qui…

Si la mission principale de la collection est de conserver la biodiversité, elle constitue également une passerelle vers le monde industriel. *« Nous vendons des souches à d'autres laboratoires de recherche, aux universités pour l'enseignement, mais aussi pour des entreprises qui cherchent des ingrédients actifs,* explique Priscillia Gourvil. *Nous en distribuons environ 1 000 par an. »* Son best-seller ? La souche 1216, une micro-algue coccolithophore de l'espèce *Emiliania huxleyi,* dont la coque calcaire fait un excellent modèle pour étudier l'effet de l'acidification des eaux. Mais la RCC893 a, elle aussi, le vent en poupe. Cette micro-algue – *Aurantiochytrium mangrovei* – est en effet très utilisée par les sociétés de cosmétiques à cause de sa forte teneur en oméga 3. Pour l'une ou l'autre, il vous en coûtera 50 euros l'échantillon de 30 millilitres si vous appartenez à un organisme public, et 150 si vous travaillez dans le secteur privé. *« Mais on ne vend pas à tout le monde,* s'exclame Priscillia Gourvil. *Nous nous assurons que les acheteurs sont capables de traiter nos souches correctement. Nous ne prenons pas le risque qu'elles soient dispersées dans l'environnement. »*

Juste à côté des cultures de micro-algues, une vaste salle abrite des aquariums, parfois situés à hauteur d'homme, contenant de magnifiques algues rouges, vertes ou brunes, dites « macro-algues », car visibles à l'œil nu. Ces plantes marines, qu'on ne voit souvent qu'échouées sur la plage – à moins de pratiquer la plongée sous-marine –, retrouvent leur majesté dans l'eau des aquariums de culture. François Thomas, microbiologiste du CNRS, devrait bientôt investir les lieux pour étudier le microbiome qui leur est associé. *« Considérer le microbiome est essentiel pour comprendre la physiologie des algues. Au-delà des enjeux pour la recherche fondamentale, cela a des implications sur les rendements, les cultures et donc toute la filière économique »*, affirme-t-il. Par exemple, si une certaine bactérie manque à l'appel dans le microbiote de la laitue de mer, les larges feuilles de cette dernière – évoquant une salade – se réduisent à de petits filaments. *« Cette bactérie secrète un composé morphogène indispensable au développement normal des feuilles. C'est une symbiose : la bactérie aide ainsi l'algue à accroître sa surface de photosynthèse ; en contrepartie, elle utilise des molécules sécrétées par l'algue comme source de carbone »*, raconte François Thomas.

Ces recherches sur les microbiotes marins sont cruciales dans le contexte du changement climatique. François Thomas étudie plus spécifiquement comment ils influent sur la résistance à la hausse de température. Par exemple, il existe en Bretagne de grandes forêts de kelp – des algues brunes laminaires qui se développent dans les grands fonds. Elles constituent des nurseries pour de nombreuses espèces de poissons, protègent les côtes contre l'érosion, et sont récoltées pour en extraire l'algine, une matière gélatineuse utilisée dans l'agroalimentaire… Bref, elles sont essentielles, tant sur le plan écologique qu'économique. *« On pense que la hausse de température va favoriser la croissance au sein du microbiote libre de certaines bactéries qui dégradent les algues. On risque donc de voir les forêts de kelp se réduire, voire disparaître… »*, redoute le chercheur. Les bouleversements globaux pourront ainsi se manifester à l'échelle locale par le biais de ces ensembles microbiens.

Et le temps presse pour pouvoir les étudier. Ils ne pourront sans doute pas empêcher la transformation des milieux sous l'effet des activités humaines, mais on peut compter sur les femmes et les hommes de science de Roscoff pour en documenter chaque étape. Et sauvegarder, au moins en termes de connaissances, ce qui sera perdu.

AGNÈS VERNET

PHOTOS : BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

FRANÇOIS THOMAS

« LA HAUSSE DES TEMPÉRATURES POURRAIT FAVORISER CERTAINES BACTÉRIES ET FAIRE AINSI DISPARAÎTRE LES FORÊTS DE KELP »

François Thomas, microbiologiste du CNRS à la Station biologique de Roscoff

DU LITTORAL À LA HAUTE MER

Le long des côtes, c'est l'ensemble des activités humaines qui est ébranlé par les changements en cours : poissons surpêchés au risque de disparaître, érosion menaçant terres et habitations, plastique transformant les bords de mer comme les eaux profondes en réservoirs de déchets toxiques. Pour protéger, atténuer, adapter, il faut une réelle volonté politique.

CORINNE ROZOTTE/DIVERGENCE

Frontignan-Plage (Hérault) devrait voir la Méditerranée s'élever de 25 centimètres à l'horizon 2050. La zone est protégée par des ganivelles (clôtures) destinées à stabiliser le sable et des épis en enrochement (en arrière-plan).

LE LITTORAL À LA MERCI DES EAUX

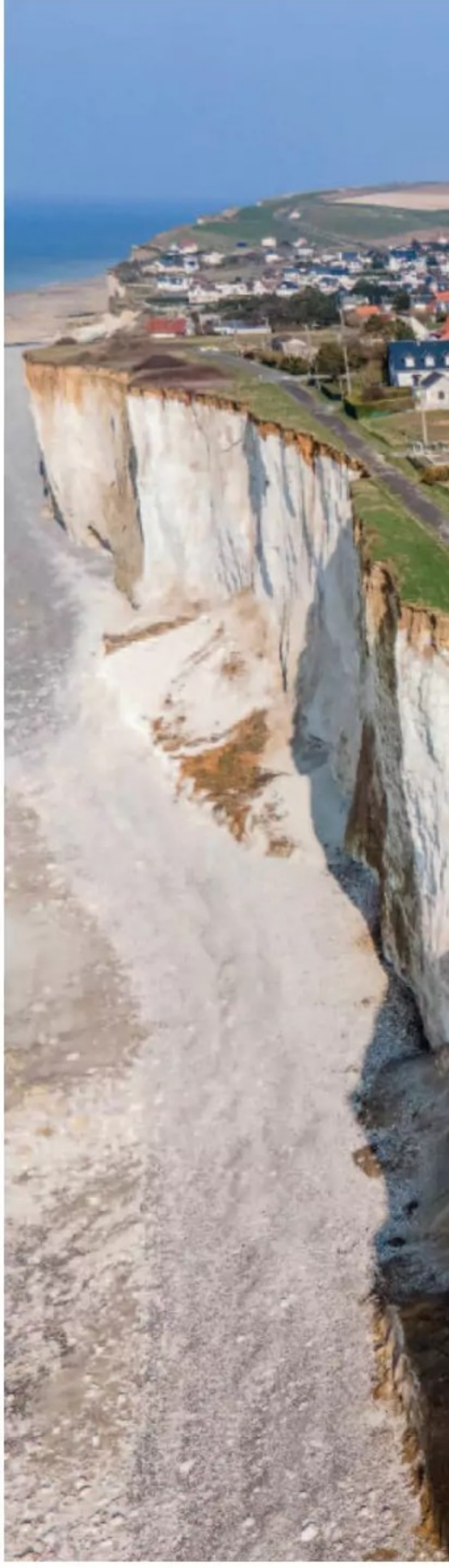
Érosion, montée des eaux, catastrophes naturelles… Les bords de mer sont vulnérables face au changement climatique. Pour anticiper les risques, il est indispensable de repenser l'aménagement des côtes.

Trente kilomètres carrés, soit l'équivalent de 4 200 terrains de football : c'est la surface de terres littorales que la France a perdue dans les 50 dernières années. Ce recul du trait de côte *(lire la définition p. 47)* concerne 20 % des rivages, soit environ 900 kilomètres de littoral, dont 270 kilomètres amputés de plus de 50 centimètres par an. En attestent les milliers de photographies aériennes digitalisées par le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), qui compare, depuis 2017, la position de cette limite avec celle des années 1920 à 1950, et qui établit un indicateur national de l'érosion côtière. Un phénomène qui n'est pas nouveau, ni dû uniquement au changement climatique.

La limite terre-mer recule un peu partout, plus ou moins rapidement, en dehors de quelques lieux précis où, au contraire… elle avance. C'est le cas des portions du littoral gagnées sur la mer à la faveur de la poldérisation ; ou lorsque la rive est soumise au phénomène « d'engraissement », par accumulation de sédiments apportés par les courants. Un dixième du littoral est concerné, dans des zones aux morphologies particulières, comme certains estuaires ou plages abritées.

À l'heure actuelle, *« la mer s'élève de 4 millimètres par an en moyenne »*, affirme Gonéri Le Cozannet, chercheur au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et contributeur du dernier rapport du Giec. Une élévation due à plusieurs facteurs. Pour 0,3 à 0,6 millimètre par an, c'est le fait de « l'addition de masse », avec l'apport d'eau par les fleuves (pluies, eaux souterraines, fonte des neiges saisonnières) ou la fonte des glaces et des calottes glaciaires (1 millimètre). À cela s'ajoute l'expansion thermique liée au réchauffement du climat et des océans (+1,5 °C en moyenne au cours du siècle dernier, + 1 °C pour la Méditerranée sur les seules 25 dernières années) : l'eau prend davantage de place à une température plus élevée. Si cette dilatation n'est pas seule responsable de la montée des eaux, elle contribue grandement à accélérer le mouvement.

Cependant, *« la modification du trait de côte est principalement liée aux vagues et au transport sédimentaire qui engendrent de l'érosion,* explique Xavier Bertin, spécialiste de l'évolution du trait de côte au Laboratoire LIENSs (Littoral, environnement et société) à l'université de La Rochelle. *En frappant le rivage, les vagues arrachent et transportent les sédiments (sable, galets, roches) vers le large ou le long de la côte. »* Les grosses particules sont



SIMON LAMBERT/DIVERGENCE

À Criel-sur-Mer (Seine-Maritime), des pans entiers de la falaise se décrochent chaque année et menacent les habitations. Ce phénomène est amplifié par le changement climatique.

Trait de côte ?

Limite complexe et mobile, le trait de côte est appréhendé de différentes manières – légale, hydrologique, géomorphologique –, en fonction du contexte et des objectifs. Il se distingue du zéro des cartes marines (niveau des plus basses mers, soit une marée de coefficient 120) ainsi que de la limite matérialisée sur les cartes topographiques de l'IGN, qui correspond au niveau moyen de la mer d'après les relevés du marégraphe de Marseille. Désormais, on préfère l'expression de « limite terre-mer » pour désigner la ligne reliant l'ensemble des points les plus extrêmes que peuvent atteindre les plus hautes eaux par temps calme, soit la limite entre la terre et le domaine public maritime.

roulées ou tractées sur les fonds marins ; les plus fines restent en suspension. Puis les courants côtiers transportent ces sédiments le long du rivage, contribuant à leur redistribution et parfois à leur départ définitif du secteur, ce qui accentue l'érosion. Celle-ci est particulièrement importante dans certaines zones : au sud de l'île d'Oléron, la pointe de Gatseau perd ainsi jusqu'à 20 mètres de terres par an, avec un record de 58 mètres pour le seul hiver 2013-2014 ! *« Les littoraux voisins des embouchures sont extrêmement mobiles, du fait d'un régime de vagues particulier lié aux passes de marées »*, explique le chercheur. Tous les grands estuaires sont touchés.

La tempête Xynthia, qui a sévi en 2010, fait référence pour les dégâts matériels

Aux vagues et au transport des sédiments qui grignotent régulièrement la côte s'ajoutent des phénomènes épisodiques – comme les tempêtes, cyclones ou tsunamis –, qui causent des submersions ponctuelles d'ampleur. Pour la France métropolitaine, la tempête Xynthia, qui a frappé la côte atlantique en février 2010, fait référence : plus de 200 kilomètres de digues endommagées et des dégâts matériels estimés à plus de 2,5 milliards d'euros. Et 53 morts. *« Eleanor, en Normandie, en 2018, a touché tout le littoral, causant ici des inondations, là de la submersion… et parfois les deux en même temps,* ajoute Benoît Laignel, professeur en géosciences à l'Université de Rouen-Normandie. *Le littoral normand est vulnérable avec ses zones sableuses sensibles à l'érosion. Mais les falaises ne sont pas épargnées, notamment au niveau des "valleuses", ces passages étroits creusés par les rivières qui deviennent des zones de concentration des eaux de ruissellement. »* Montée du niveau de la mer, augmentation de la fréquence et de la violence des tempêtes : les modifications climatiques vont accélérer ◆◆◆

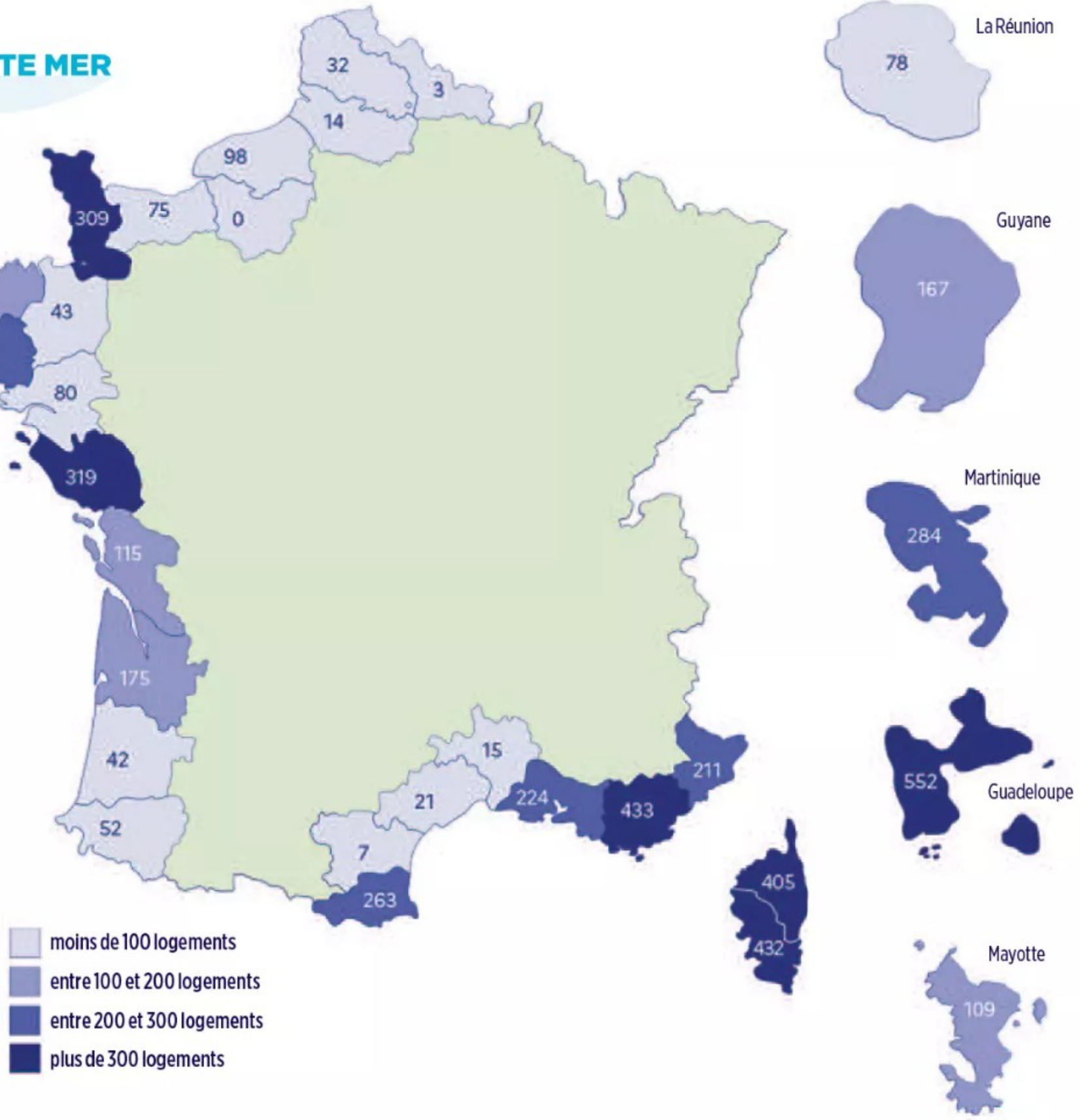
Dynalit (Service national d'observation de la dynamique du littoral et du trait de côte), www.dynalit.fr

ROL *(Réseau d'observation du littoral Normandie et Hauts-de-France)*, www.rolnhdf.fr

Cerema *(Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)*, «Les enjeux du recul du trait de côte d'ici à 2100», sciav.fr/Cerema

Des milliers de logements menacés d'ici à 2050

Estimation de l'impact de l'évolution du trait de côte sur le logement en France, faite par le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement). Au total, plus de 5 000 logements sont menacés d'ici à 2050, dans un scénario jugé « vraisemblable ».
Un deuxième scénario, dit « de l'inaction » (en termes de défense côtière), estime le nombre de logements menacés d'ici à 2100 à presque 430 000.



CEREMA

◆◆◆ le recul, avec des risques de submersion plus fréquents. Et ce, quel que soit le scénario. Le recul se traduit aussi par la salinisation des sols et la disparition de zones humides. Sans vouloir coûte que coûte rendre aux littoraux leur état « originel », le Conservatoire du littoral *(lire aussi p. 20)* acquiert des terres pour restaurer des dynamiques naturelles.

Suivre la montée de la mer en tenant compte des spécificités locales

Il s'agit d'améliorer l'état écologique et la fonctionnalité naturelle des zones côtières, souvent en supprimant des aménagements artificiels (digues, remblais, constructions), en réintroduisant des espèces locales, ou encore en redonnant à la mer ou aux cours d'eau leur espace d'expansion naturel, contribuant ainsi à restaurer la biodiversité. *« L'idée n'est pas de laisser la mer reprendre ses droits partout,* précise Cédric Bohun, délégué rivages au Conservatoire du littoral. *Certains enjeux économiques doivent être protégés : c'est le cas pour des stations balnéaires, comme à Lacanau, où les enrochements ont été rehaussés de 1,5 mètre en 2023, ou pour des terres agricoles, telle la Camargue, où les digues ont été renforcées. »*

L'Occitanie a été une des premières régions à supprimer des routes littorales. Après plus de dix années de concertation, la plage du Petit Travers, à Carnon (Hérault), a pu retrouver son cordon dunaire, cette ligne sableuse qui forme une barrière entre terre et mer. Ce chantier faisait partie des premiers sites pilotes du projet européen Life Adapto (2017-2022) initié par le Conservatoire du littoral, aux côtés de dix autres, comme la baie de Lancieux en Bretagne ou les Vieux Salins d'Hyères, dans le Var : consolidation partielle des digues, libre remontée des eaux créant des prés salés. *« Nous élaborons différents scénarios avec les usagers et les collectivités, qui décident ensemble selon leurs priorités »*, résume sa coordinatrice, Raquel Da Cruz. Un deuxième projet, Adapto+, vise à systématiser cette approche « douce » sur quinze nouveaux sites dès 2025, puis dix autres d'ici à 2029. Il ambitionne aussi de créer un outil d'aide à la décision accessible aux différents acteurs.
Il est indispensable d'anticiper au plus fin la montée des eaux pour planifier les aménagements nécessaires. Car *« la mer monte, certes, mais pas de manière uniforme »*, confirme Angélique Melet, chercheuse à Mercator

Océan, une structure de recherche en océanographie opérationnelle. À partir d'observations satellite et de modèles numériques, Mercator Océan a développé un jumeau numérique des océans, une réplique digitale qui permet de simuler différents scénarios. *« Mais attention, ce n'est qu'une première étape,* prévient-elle. *Nos projections sont précises à une échelle régionale, mais pour agir localement, il faut affiner les données. »*

Les trois quarts des sites Seveso de la vallée de la Seine seront inondés

À l'horizon 2100, selon les projections du Cerema, le recul du trait de côte menacerait entre 5 000 et 50 000 logements en France métropolitaine et d'Outre-mer. Si les communes littorales s'en inquiètent aujourd'hui – et à juste titre –, c'est surtout parce que des constructions ont investi de manière « invasive » des zones exposées depuis les années 1960-1970 ; et qu'il y a urgence à protéger, mais surtout déplacer des quartiers entiers aujourd'hui arrivés en première ligne. Dans des territoires très industrialisés, l'inquiétude monte d'un cran : *« Dans la vallée de la Seine, quasiment les trois quarts des sites Seveso* [sites industriels pouvant présenter des risques écologiques et sanitaires majeurs, ndlr] *seront inondés »*, affirme Benoît Laignel. Ce qui soulève une problématique en cascade : risques industriels, sanitaires, économiques et sociaux. Pour le chercheur, *« le changement climatique est un accélérateur des risques »*.

En France, 864 communes sont « particulièrement vulnérables » aux submersions marines, exposant 1,5 million d'habitants. Parmi elles, 317 communes volontaires pour agir se sont inscrites sur une « liste » initiée par décret dans le cadre de la loi Climat et Résilience, adoptée en 2021, et bénéficient à ce titre d'aides financières pour les études nécessaires à la construction de leur carte locale d'exposition au recul du trait de côte (CLERTC). Il s'agit pour elles de déterminer les enjeux et de les situer sur une échelle temporelle, de définir des zones inconstructibles à l'horizon 0-30 ans et des scénarios d'adaptation à 30-100 ans.

Mais le contexte législatif est complexe : la submersion, risque naturel, permet d'accéder au Fonds Barnier ou Fonds de prévention des risques naturels majeurs, mis en place en 1995 ; ce qui n'est pas le cas des questions d'érosion côtière, relevant de la loi Climat et Résilience. Près des côtes, des habitations pourront être indemnisées suite à une tempête, alors que plus bas dans la même rue, d'autres grignotées par l'érosion ne le seront pas. Gonéri Le Cozannet s'inquiète particulièrement des répercussions sociales : *« Un système d'indemnisation équitable doit être instauré en France. Sinon, les dédommagements se régleront par procès individuel. Ce qui favorisera des personnes capables d'accéder aux meilleurs avocats. »*

CÉDRIC BOHUN

« L'IDÉE N'EST PAS DE LAISSER LA MER REPRENDRE SES DROITS PARTOUT. LES STATIONS BALNÉAIRES OU LES ZONES AGRICOLES DOIVENT ÊTRE PROTÉGÉES »

Cédric Bohun, délégué rivages au Conservatoire du littoral

Pour Hélène Rey-Valette, maîtresse de conférences en économie à l'université de Montpellier, ce n'est pas par manque de moyens que le déplacement préventif des activités ou des habitations patine. *« Intégrer la dimension humaine et sociale aux études est essentiel à la compréhension des mécanismes qui se jouent. Ce n'est pas qu'une question de relocalisation et de mesure du sable. »* Depuis plus de vingt ans, elle travaille en impliquant la population dans ses projets et constate surtout que *« les gens ne veulent pas quitter leur lieu d'habitation, pensant qu'une fois de plus, ils s'adapteront : il y a un déni de l'urgence à s'éloigner du littoral ! »*

VALÉRIE HANDWEILER

Zoom sur les houles australes

« *À La Réunion, ce 12 mai 2007, la mer était calme et le temps très beau. Personne ne s'est méfié…*, raconte Axelle Gaffet, doctorante au laboratoire LIENSs de l'université de La Rochelle. *Quand un énorme paquet de vagues est arrivé, causant des dégâts terribles. »* À 19 heures, l'île enregistre une hauteur de vague maximale de 11,30 mètres. Bilan : plus de 300 constructions endommagées, un camping totalement submergé, plusieurs blessés et deux morts. Que s'est-il passé ? « *Dans les îles du Pacifique ou de l'océan Indien,* poursuit la chercheuse, *les submersions marines sont principalement causées par deux phénomènes : les cyclones et les houles australes. »* Ces dernières sont générées par des tempêtes qui se forment, en hiver, au-delà des « 40es rugissants », avec des vents puissants et réguliers soufflant sur d'immenses surfaces océaniques – la zone de fetch. De hautes vagues se déplacent alors vers le nord, s'ordonnant en un train de houle régulier progressant sur des milliers de kilomètres.

La force destructrice de ces houles sournoises peut dépasser celle des cyclones ou d'un tsunami, comme ce fut le cas en Polynésie française en 1996. Avec l'élévation du niveau marin, même une « petite houle » causera davantage de dégâts, surtout lorsque les récifs coralliens, barrière naturelle, sont dégradés, et d'autant plus avec le phénomène de subsidence (enfoncement naturel) spécifique à certaines îles.

DES AIRES MARINES PROTÉGÉES… MAIS PAS ASSEZ

40 % des stocks de poissons ne se renouvellent pas assez. Le garde-manger de l'humanité se vide… Pourtant, les solutions existent : protéger réellement les espaces marins de la pêche industrielle entraîne un repeuplement rapide. Manque juste… la volonté politique.

DIDIER FOURAMONT/ RESERVEMARINE DECERBBERE-BANYULS/AFP

Sanctuaire. Créée en 1974, la réserve naturelle nationale de Cerbère-Banyuls (Pyrénées-Orientales) garantit sur 650 hectares une protection totale des 539 espèces qu'elle abrite (ici, un mérou brun). Sa surface devrait prochainement doubler.

Ne pas toucher. Contempler, mais ne rien perturber. La réserve naturelle nationale de Cerbère-Banyuls (Pyrénées-Orientales) ne se visite qu'avec palmes, masque et tuba, le long d'un sentier sous-marin strictement balisé. L'oursin violet et le corail rouge figurent parmi les 539 espèces recensées de ce milieu d'une richesse exceptionnelle. Entre 15 et 30 mètres de fond, les herbiers de posidonies abritent sars, daurades et saupes. Un spectacle rare : cinquante et un ans de protection totale ont généré un écosystème complet, qui tranche avec les fonds voisins où les poissons sont surpêchés et les posidonies arrachées par les ancres des bateaux. Cela donne aux apnéistes d'aujourd'hui une petite idée de la Méditerranée d'autrefois. Et de l'ampleur des efforts à entreprendre pour protéger réellement 30 % des espaces marins, un objectif sur lequel s'est engagée la communauté internationale lors de l'adoption de l'accord de Kunming-Montréal, en décembre 2022.

La réserve de Cerbère-Banyuls est un confetti de 650 hectares. Une minuscule « aire marine protégée » (AMP). Sur la façade méditerranéenne, il n'y a guère que la réserve de Port-Cros (Var), avec ses 60 hectares, qui atteigne le même niveau de protection, ainsi que les 85 hectares de Carry-le-Rouet (Bouches-du-Rhône). *« Officiellement, pourtant, près de 60 % des eaux littorales méditerranéennes françaises sont des AMP*, note Joachim Claudet, directeur de recherche au Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement (Criobe/CNRS), à Perpignan. *Mais les zones réellement contrôlées ne représentent que 0,01 % de la zone économique exclusive* [ZEE, zone sur laquelle l'État exerce des droits d'exploitation sur les ressources, *ndlr*] *de la façade méditerranéenne française. »* Les autres pays méditerranéens ne font pas mieux. Seuls 6 % de la Méditerranée sont couverts par un statut de protection, mais dans 95 % de ces espaces, la réglementation n'est pas plus sévère qu'à l'extérieur de leurs limites. Ainsi, le chalutage ou la pose de filets maillants dérivants n'y sont pas interdits. On compte aujourd'hui près de 20 000 AMP couvrant 10 % de la surface des mers du globe. Mais moins de 1 % d'entre elles bénéficient de réelles interdictions d'exploitation.

Une protection effective : c'est ce que réclament les scientifiques. Ce qui implique des mesures fortes. En la matière, c'est le classement établi par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) qui donne les règles à respecter pour offrir des garanties sérieuses. L'organisation intergouvernementale a créé six catégories de protection. Les quatre premières interdisent tout type de prélèvement d'animaux, de végétaux et de minéraux, limitent les activités touristiques ou récréatives qui peuvent être tolérées. En clair, la pêche y est interdite, sauf dans ses formes les plus traditionnelles. Aucune des six catégories de protection n'autorise la pêche industrielle. Le classement UICN implique donc l'interdiction du chalutage pélagique et du chalutage de fond (traction d'un filet en pleine eau pour le premier ou au fond pour le second) et de la senne danoise (filet en forme d'entonnoir tracté sur le fond), pratiques considérées comme les plus destructrices du milieu marin. Des forces de police sont ainsi nécessaires pour faire respecter la réglementation.

Les engagements de la communauté internationale en échec

Si la question de la protection des espaces marins se pose aujourd'hui avec autant d'acuité, c'est que les preuves d'une surexploitation des ressources s'accumulent depuis le début de ce siècle. Selon la FAO, 40 % des stocks de poissons (parties exploitables de la population d'une espèce dans une zone donnée) sont actuellement extraits dans des proportions telles que les générations n'ont plus le temps de se renouveler. On était à moins de 10 % en 1974. Ce garde-manger de l'humanité est en train de se vider. À Nagoya (Japon), en 2010, la communauté internationale a ainsi décidé à l'unanimité que *« d'ici à 2020, tous les stocks de poissons et d'invertébrés et plantes aquatiques [seront] gérés et récoltés d'une manière durable, légale, et en appliquant des approches fondées sur les écosystèmes, de telle sorte que la surpêche soit évitée »*. Ce noble projet a été conforté ◆◆◆

CNRS

« 60 % DES EAUX LITTORALES MÉDITERRANÉENNES FRANÇAISES SONT DES AMP, MAIS 0,01 % SONT RÉELLEMENT CONTRÔLÉES »

Joachim Claudet, directeur de recherche au Centre de recherches insulaires (Criobe), Perpignan

◆◆◆ en 2015 par les Objectifs du développement durable, qui reportent l'échéance à 2030. Mais aujourd'hui, l'échec de l'action des États est patent : loin d'être stoppée, la surexploitation continue *(lire aussi p. 57)*.

Les pêcheurs vent debout contre la protection stricte des océans

Sur le papier, pourtant, les AMP se sont multipliées. La France, par exemple, en compte à ce jour 565 ! *« Les gouvernements ont voulu répondre à leurs engagements internationaux en délimitant des zones, mais sans pour autant voter des réglementations contraignantes, ni allouer des budgets pour la gestion et la surveillance des aires désignées »*, constate Rodolphe Devillers, géographe marin à l'Institut pour la recherche et le développement (IRD). Les scientifiques ont donc très rapidement dénoncé ces *« AMP de papier »*.

On assiste même à des effets d'aubaine qui aggravent encore les pressions sur l'environnement. C'est ce qu'a pu mesurer Rodolphe Devillers dans une enquête sur des AMP de Tanzanie, publiée en octobre 2024 dans la revue *Conservation Letters*. La création d'une aire protégée sur l'archipel de Zanzibar, en 2004, avait été l'occasion pour la Banque mondiale de mener une enquête fouillée sur le niveau de vie dans les bourgades riveraines : qualité de l'habitat, possession d'appareils ménagers, de véhicules, etc. *« Dix-huit ans plus tard, nous avons posé les mêmes questions aux habitants*, raconte le chercheur. *Et nous avons constaté que plus les gens habitent près de l'aire marine, plus leur niveau de vie s'est amélioré. Mais malheureusement pas du fait de la protection de l'environnement, puisque ces AMP ne sont pas réglementées. »* Ce qu'il s'est passé, c'est que le statut accordé aux îles a permis le développement d'un « écotourisme » s'appuyant sur l'image positive accordée par le statut de protection. *« Les pêcheurs vivant à proximité des AMP tirent des revenus de la commercialisation du poisson dans les hôtels, mais aussi de l'organisation d'excursions sur les sites*

La faune sous-marine déboussolée par le vacarme humain

C'est l'un des enjeux de la conférence des Nations unies sur l'Océan (Unoc) : réduire la pollution sonore. Si les mers du globe résonnent naturellement de toutes sortes de sons, l'activité humaine engendre une véritable cacophonie dans certains secteurs. Principales sources de bruit : les bateaux, en particulier les cargos. Le niveau sonore des hélices peut atteindre 180 décibels ! Dans un article publié en 2023 dans la revue *Science Advances*, une équipe danoise a montré qu'un ralentissement même modéré de la vitesse des navires permettrait de diminuer une grande partie de l'impact de leur bruit sur la faune marine. Mais les océans sont également perturbés par les sonars ou les canons à air utilisés pour la prospection pétrolière ou les études sismologiques. Plus localement, les ports et les éoliennes sont aussi des sources de nuisances sonores.

Le son se propage cinq fois plus vite dans l'eau que dans l'air, et il est trois fois moins atténué : des bruits parasites peuvent donc s'entendre de très loin et blesser de nombreuses espèces d'animaux. Les cétacés y sont particulièrement sensibles. Ils peuvent ainsi subir des pertes auditives temporaires ou permanentes. La pollution sonore masque aussi leurs vocalisations, car elle se situe dans les mêmes fréquences : *« Sous l'eau, la communication orale est le meilleur moyen de rester en contact,* explique Loanne Pichot, doctorante en bioacoustique. *Les mammifères marins utilisent donc beaucoup cette dernière pour se repérer, se nourrir ou se reproduire… »*

Des études physiologiques ont montré que cette pollution est source de stress, ce qui peut aussi provoquer des comportements dangereux ou à risque : ainsi, des baleines à bec auraient eu des accidents de décompression en remontant trop vite de leur plongée après avoir été confrontées au bruit de sonars militaires. **MARIKA JULIEN**

LORRAINE TURCI/HANSLUCAS/GREENPEACE

préservés. De plus, les communautés riveraines perçoivent des subventions de l'État issues des taxes sur le tourisme », explique Narriman Jiddawi, spécialiste tanzanienne des pêcheries. Malgré ce résultat ambigu, l'enquête des chercheurs de l'IRD permet de combattre l'idée selon laquelle les AMP se font au détriment de l'économie locale. Car la protection stricte des océans est vécue par les pêcheurs comme une menace à leur survie économique. En France, ils ont le sentiment qu'on est en train de mettre tout l'océan « sous cloche » à leurs dépens… alors que ce n'est pas le cas. *« Outre l'absence de réglementation forte, la plupart des AMP françaises sont situées dans des régions où la pression humaine est faible, voire inexistante,* constate Joachim Claudet. *Ainsi, 80 % de leur surface se situe dans les eaux des terres australes et antarctiques. »*

Pourtant, les pêcheurs ont tout à gagner de l'établissement d'aires réellement protégées. Les faits sont là : un moratoire sur les captures entraîne un repeuplement rapide. Il suffit ensuite de quelques années pour que les populations renouvelées prospèrent également autour de ces AMP. L'équipe de Joachim Claudet l'a démontré en modélisant, en Méditerranée, l'évolution d'un poisson très courant, le sar commun. Après quarante ans de protection forte, la biomasse des poissons augmente de 90 % et les prises par la pêche à l'extérieur de la réserve de 60 %. Une autre étude, menée par le Centre océanographique des Baléares, montre une augmentation des prises de poisson autour de six réserves strictement protégées jusqu'à 2,5 kilomètres des limites des réserves. En Polynésie, les prises de thons obèses augmentent de 18 % à proximité des zones protégées. *« Notre travail n'est pas dirigé contre l'activité des pêcheurs,* martèle Joachim Claudet. *Nous voulons au contraire les accompagner dans la mutation économique que va leur demander la protection des océans. »*

Vigilance. À la fin de l'année 2024, l'association Greenpeace a sillonné la Manche pour documenter les activités de pêche industrielle dans plusieurs aires marines protégées.

Une localisation de plus en plus précise des espèces marines dans tous les océans

L'enjeu des prochaines années est donc double : définir précisément les zones de forte biodiversité et d'abondance des espèces, afin d'y concentrer les efforts de protection. Et convaincre les pêcheurs. Les outils pour atteindre le premier objectif sont robustes. En septembre 2021, un article paru dans la revue *Science* en donnait le détail. *« Pour déterminer les zones marines où la biodiversité est la plus forte, nous utilisons désormais une cartographie des habitats benthiques* [situés au fond des mers, ndlr] *où se trouvent des communautés biologiques spécifiques,* précise Joachim Claudet. *Elle est croisée avec l'outil AquaMaps, qui donne la probabilité de présence des espèces marines dans tous les océans. »* En avril 2025, les chercheurs du Criobe ont ainsi publié les cartes des zones marines de l'hexagone où la protection aurait un effet maximal : 35 000 kilomètres carrés répartis entre Manche, Atlantique et Méditerranée. Il faudrait interdire de pêche 10 % des AMP métropolitaines actuelles pour obtenir un bon résultat. Pour l'heure, lors de l'Unoc, le président Emmanuel Macron a annoncé que 4% des aires marines protégées seraient désormais en protection forte, sans chalutage de fond.

Convaincre les professionnels de la mer est un défi autrement plus compliqué. *« Il s'agit d'un choix politique,* conclut le chercheur : *il faut décider d'aider les pêcheurs pendant cette période de transition de quelques années où la protection n'a pas encore donné tous ses effets bénéfiques sur la pêche. »* **LOÏC CHAUVEAU**

R. DEVILLERS

« IL N'Y A NI RÉGLEMENTATION CONTRAIGNANTE NI BUDGETS POUR LA GESTION ET LA SURVEILLANCE DE CES AIRES »

Rodolphe Devillers, géographe marin à l'Institut pour la recherche et le développement

Microplastiques, mégapollution

Un camion poubelle : c'est la quantité de plastique que les océans reçoivent chaque minute. Dans cette masse, plus les particules sont infimes, plus elles sont toxiques.

Un continent de plastique, six fois plus grand que la France, dans le Pacifique Nord ; des marées noires dues à des explosions de plateformes, des naufrages de pétroliers ou des dégazages sauvages ; des efflorescences d'algues vertes toxiques sur les plages à cause des rejets massifs d'engrais azotés… Ces phénomènes spectaculaires illustrent de manière alarmante la pollution des océans. Pourtant, ce n'est que la partie émergée de l'iceberg. Car une pollution plus discrète mais très persistante est à l'œuvre. Émanant notamment du plastique – qui se fragmente tôt ou tard en microparticules – et du mercure, elle s'installe jusqu'au plancher océanique. Difficile à quantifier, elle menace non seulement tous les écosystèmes marins, mais aussi la santé humaine via la chaîne alimentaire : plus de 3 milliards de personnes dépendent des produits de la mer pour leur alimentation.

Prenons les microplastiques, en croissance exponentielle depuis vingt ans. Actuellement, que ce soit via les fleuves, les réseaux d'eaux usées et pluviales ou les activités du littoral, les océans reçoivent entre 10 et 20 millions de tonnes de plastique par an – l'équivalent d'un camion poubelle par minute. *« Ce flux annuel pourrait atteindre les 43 millions de tonnes en 2060 si l'on ne limite pas la production ni la pollution »*, alerte Jeroen Sonke, chercheur en géosciences de l'environnement au CNRS. Depuis les années 1950, plus de 200 millions de tonnes auraient été ainsi larguées dans les océans. Pour-

À ciel ouvert. Débris déposés par les vagues, décharges sauvages constituées par les humains : de plus en plus de rivages sont souillés par les plastiques. Ici, sur l'île de Wight (Royaume-Uni).

tant, la fraction qui flotte à la surface, notamment dans les cinq gyres – ces gigantesques tourbillons résultant de la convergence de courants marins – ne représente que 2 % de ce total. Que deviennent les 98 % restants ?

Une partie d'entre eux, non quantifiée, retourne à la côte. Des marées de plastiques envahissent ainsi des plages de Bali après la mousson ; certains, transformés en aérosols par des vagues déferlantes, finissent dans les neiges, les glaciers et les lacs de montagne. Le reste du flux des déchets, fragmenté sous l'effet des UV et des vagues en microparticules plus denses que l'eau, plonge dans les profondeurs où il est difficile à suivre, car il est entraîné par les courants océaniques.

Une fraction sans doute non négligeable est ingérée par les animaux marins : du plancton aux tortues, on en a trouvé dans de nombreuses espèces. Une autre, colonisée par des organismes vivants, sédimente au fond ou dans les zones côtières. Les microplastiques finissent par se fragmenter à leur tour en nanoparticules (moins de 0,001 millimètre) encore plus difficiles à quantifier.

GETTY IMAGES

EXPÉDITION 7E CONTINENT

« LA FRAGMENTATION EN MICROPARTICULES NE SE PRODUIT PAS SEULEMENT DANS L'OCÉAN MAIS AUSSI EN AMONT, PAR L'USURE QUOTIDIENNE DES OBJETS CONTENANT DU PLASTIQUE »

Alexandra Ter Halle, physico-chimiste, université de Toulouse

Publiés en avril dernier, les résultats de la mission Tara Microplastiques, menée en 2019 sur neuf grands fleuves européens, apporte un éclairage inédit et inquiétant. *« Nous avons trouvé des microplastiques partout »*, indique Jean-François Ghiglione, spécialiste d'écotoxicologie marine au CNRS et directeur scientifique de la mission. Or, comme chacun sait, les fleuves se jettent dans… la mer. Les chercheurs ont analysé deux catégories de microplastiques : les grands (de 5 à 0,5 mm), les plus étudiés jusqu'à présent, et les petits, invisibles (0,5 à 0,025 mm), dont la masse a été mesurée pour la première fois grâce à une nouvelle méthode combinant la pyrolyse (chauffage à 600 °C), la chromatographie gazeuse (technique permettant de séparer les molécules) et la spectrométrie de masse (qui analyse la masse des substances chimiques afin de les caractériser). *« La concentration des petits microplastiques est en moyenne 35 fois supérieure à celle des grands. Elle peut atteindre 100 microgrammes par litre, du jamais vu pour aucun autre polluant dans les fleuves »*, note la physico-chimiste Alexandra Ter Halle, chercheuse CNRS à l'université de Toulouse, qui apporte une explication : *« La fragmentation en microparticules ne se produit pas seulement dans l'océan, mais aussi en amont, en raison de l'usure quotidienne des objets contenant du plastique : frotte-* ◆◆◆

P. PLEUL/DPA/ZUMA/REA

Double peine. Les centrales à charbon (ici en Allemagne) émettent du CO_2, aggravant ainsi le changement climatique, mais elles rejettent aussi un élément très toxique : le mercure.

◆◆◆ *ment des pneus ou des bouchons de bouteille, lavage des vêtements, paillage agricole, etc. »* Les microplastiques peuvent servir de « radeaux à contaminants » : une bactérie pathogène – susceptible de provoquer des infections de type otite ou péritonite – a ainsi été pour la première fois identifiée sur l'un d'eux par la mission Tara. Ils véhiculent aussi une considérable diversité de produits chimiques potentiellement toxiques (additifs, métaux lourds, colorants…) : plus de 16 000 de ces molécules entrent dans la fabrication des plastiques. Or la toxicité des particules s'avère inversement proportionnelle à leur taille : plus elles sont petites, plus elles pénètrent facilement dans le sang et les organes.

La pollution au mercure touche toute la chaîne alimentaire

Quantifier les plus petites d'entre elles, les nanoparticules, dans l'eau de mer devient donc une priorité. Une méthode mise au point par une équipe chinoise semble prometteuse. Elle a permis d'identifier des nanoparticules de nylon, de polystyrène et de PET (polyéthylène téréphtalate, le plastique des bouteilles d'eau), dans deux sites océaniques. *In fine*, devant l'étendue du problème, alors qu'un traité mondial contre la pollution plastique pourrait enfin être signé cet été, de nombreux scientifiques plaident pour réduire la production et interdire d'y incorporer des produits chimiques toxiques.

Autre pollution marine invisible et menaçante pour la chaîne alimentaire, qui a fait parler d'elle récemment : celle au mercure. Ou, plutôt, à l'une de ses formes dégradées, le méthylmercure. Car ce dernier est neurotoxique. Ingéré sur de longues périodes et à doses élevées, il provoque des déficits cognitifs, notamment chez les enfants.

Des taux élevés de méthylmercure ont été retrouvés dans certaines boîtes de thon vendues en France et testées par l'association pour la protection des océans Bloom à l'automne 2024 : 3,9 mg / kg pour le produit le plus contaminé, alors que le maximum autorisé pour les gros poissons (thon, espadon, requin) est de 1 mg / kg. En outre, plus de 50 % des conserves testées présentaient un taux supérieur à 0,3 mg / kg, qui est le seuil fixé pour les petits poissons (sardines) et les crustacés. *« Or il n'y a aucune raison scientifique pour augmenter le seuil avec la taille du poisson »*, assure l'océanographe chimiste du CNRS Lars-Eric Heimbürger-Boavida, spécialiste du mercure. Est-ce à dire qu'il faut impérativement s'abstenir de manger du thon en conserve ? *« Non*, tempère-t-il, *car l'étude de Bloom n'a porté que sur 148 boîtes, alors qu'il faudrait en tester un bien plus grand nombre pour en tirer une conclusion objective. Reste qu'il faut privilégier la consommation de petits poissons riches en oméga-3 dont la teneur en méthylmercure est plus réduite. »*

L'important est donc de comprendre d'où vient cette contamination afin de savoir si l'on peut la réduire… Ce qui n'est pas une mince affaire. Le mercure, sous sa forme gazeuse, est émis à la fois naturellement par le volcanisme terrestre et sous-marin, et artificiellement par la combustion des énergies fossiles, principalement dans les centrales à charbon. *« Les émissions de mercure dans l'atmosphère dues à cette combustion sont évaluées à 2500 tonnes par an. Elles sont susceptibles de gagner toutes les régions du globe, y compris les plus reculées, donc de polluer tous les océans. S'y ajoutent 600 tonnes de mercure véhiculées par les cours d'eau et provenant d'eaux usées et de l'orpaillage »*, précise Lars-Eric Heimbürger-Boavida. Mais le problème la part de ce mercure anthropique absorbée par les océans n'est pas quantifiée avec précision. Pas plus que ne l'est le mercure naturel émanant des fluides hydrothermaux issus des volcans sous-marins. Or, quelle que soit sa source, le mercure océanique peut être transformé par des bactéries en ce redoutable méthylmercure, qui contamine toute la chaîne trophique. Il est amplifié d'une espèce à l'autre au long de cette chaîne alimentaire, jusqu'à des millions de fois pour un gros prédateur comme le thon. Dernier sujet d'inquiétude : le réchauffement climatique – les bactéries aiment la chaleur – favorise sa production. En Arctique, la fonte progressive du pergélisol, où sont enfouies environ 600 000 tonnes de mercure, fait donc redouter une forte contamination des animaux marins à l'avenir. Une raison de plus de lutter contre le réchauffement climatique.

MARIE-LAURE THÉODULE

Daniel Pauly
Biologiste marin, professeur d'halieutique à l'université de Colombie-Britannique à Vancouver (Canada)

« Face aux lobbies de la pêche, il est urgent que les États interviennent »

GEOFFROY VAN DER HASSELT / AFP

Logique de conservation contre logique de profit à court terme : les États doivent se résoudre à faire plier les armateurs et à imposer des règles de protection contraignantes.

Quel est l'état de la réserve halieutique de nos océans ?
Elle est en déclin depuis les années 1880, moment où l'on est passé d'une pêche artisanale à une pêche industrielle. Déclin qui s'est accéléré à partir des années 1960, lorsque le nombre et la puissance des bateaux de pêche ont explosé. L'arrivée des chalutiers géants, dont les plus gros peuvent capturer plus de 200 tonnes de poissons par jour, a fini par vider les océans. D'après une étude publiée en 2010 dans *Nature Communications*, la biomasse de poissons au large des côtes anglaises s'est effondrée de 95 % en un siècle. À l'échelle mondiale, ce chiffre est estimé à 80 %. Les eaux européennes, comme celles de la Chine et du Japon, sont les plus dépeuplées. Et le problème s'étend comme une tache d'encre car, une fois les stocks épuisés, les armateurs envoient leurs bateaux sur de nouvelles zones de pêche à l'étranger.

Quelles sont les espèces les plus menacées ?
Ce sont d'abord celles pour lesquelles la demande est forte, comme les sardines ou les anchois, qui sont transformés en farine et servent à nourrir les poissons d'élevage. Les espèces à reproduction lente, tels les requins et les esturgeons, sont aussi exposées. Seules les espèces mésopélagiques (qui vivent entre 200 et 1 000 mètres de profondeur) ne formant pas de bancs, comme le poisson-lanterne (*Benthosema glaciale*), sont encore protégées.

Comment enrayer le déclin de ces populations ?
Le seul moyen est de limiter l'effort de pêche *[l'activité de pêche sur un secteur donné : nombre et puissance des navires, temps passé en mer, etc., ndlr]*. D'après nos modèles mathématiques, il faudrait que la biomasse des stocks de poissons, aujourd'hui autour de 20 % de ce qu'elle était avant l'ère des pêches industrielles, remonte à une valeur seuil de 50 %. Cela permettrait de reconstituer les réserves, et d'avoir des prises élevées même avec un effort de pêche modéré.

Quelles mesures faudrait-il prendre pour limiter cet effort de pêche ?
Le secteur de la pêche est avant tout guidé par la recherche de profit à court terme et il dispose de puissants lobbies. Résultats : les États craignent de prendre position contre les armateurs. Il est pourtant urgent qu'ils interviennent ! Une des mesures défendues par la communauté scientifique est l'arrêt des subventions. Aujourd'hui, si une zone ne produit plus suffisamment de poissons, les pêcheries – notamment celles d'Europe et d'Asie – perçoivent des aides publiques pour que pêcher y demeure rentable… Au risque d'épuiser complètement les ressources.

Pourrait-on davantage protéger certaines parties de l'océan ?
L'accord de Kunming-Montréal, signé en 2022 lors de la COP15, ambitionne de protéger 30 % de la surface des océans d'ici 2030. Mais que signifie réellement « protéger » ? Aucune définition précise n'en a été donnée. En France, il est par exemple possible de pêcher dans des aires marines protégées, y compris au chalut, une technique particulièrement dévastatrice qui racle les fonds marins. Il faudrait donc, déjà, que ces aires portent bien leur nom *(lire aussi p. 50 - 53)*. La pêche en haute mer *[au-delà de 200 milles nautiques des côtes, ndlr]*, aujourd'hui pratiquée par une dizaine de pays seulement, devrait aussi être interdite. Car si cette zone maritime, qui couvre les deux tiers des océans, n'était plus accessible, les stocks se reconstitueraient, les poissons migreraient plus près des côtes et la pêche profiterait à davantage de pays, y compris aux plus pauvres.

PROPOS RECUEILLIS PAR RIVA BRINET-SPIESSER

David Grémillet, *Daniel Pauly, un océan de combats,* Wildproject, 2019

Dulse, laitue de mer ou laminaires… des algues à tout faire

Elles constituent un mets à la fois savoureux et riche en nutriments , peuvent remplacer les fertilisants ou le plastique des emballages, et même lutter contre certaines infections. Faciles à cultiver, sans engrais, ni terre, les algues deviennent une ressource de premier plan. En France, une véritable filière se met en place.

« *Les algues sont à la base de la vie sur Terre, mais nous commençons tout juste à comprendre l'étendue de leurs bénéfices* », s'exclame Vincent Doumeizel, conseiller Océan aux Nations unies. Un exemple au hasard : *Asparagopsis taxiformis*, une petite algue rouge commune. Selon une étude américaine parue dans la revue *PLOS One* en 2021, elle serait capable de réduire de plus de 80 % les émissions de méthane chez les bovins. « *En donnant chaque jour 40 grammes de cette algue à toutes les vaches du monde, c'est comme si l'on arrêtait la circulation de toutes les voitures et tous les camions du jour au lendemain* », s'enthousiasme le spécialiste. Toutefois, son effet sur la santé des bovins doit encore être affiné.

En condiment, en papillote avec un poisson, ou même en tartare

« *Malgré les mille services qu'elles sont susceptibles de rendre, les algues souffrent encore d'une mauvaise image auprès des consommateurs* », regrette Vincent Doumeizel, qui propose une solution pour modifier cette perception : apprendre à les cuisiner, en condiment pour agrémenter une purée ou une salade, en papillote avec un poisson, en bouillon, ou même en tartare ! « *On imagine qu'elles sont immangeables parce qu'on a en tête l'image – et parfois l'odeur – de celles qui se décomposent sur la plage. Mais c'est comme si vous compariez une belle assiette de frites à un tas de pommes de terre pourries* », illustre l'expert. Les algoculteurs français commencent à cultiver la dulse – *Palmaria palmata*, une algue rouge –, ou encore la laitue de mer – *Ulva lactuca*.

Mais si les algues sont de véritables trésors nutritionnels, riches en fibres, vitamines et micronutriments tels que le fer, elles peuvent s'inviter aussi dans nos armoires à pharmacie. « *Ce sont les prébiotiques naturels les plus puissants au monde* », signale Vincent Doumeizel. Depuis les années 1990, on découvre leurs propriétés exceptionnelles pour lutter contre les champignons, les bactéries, les virus, l'inflammation et la douleur. L'étude de leurs composés actifs s'est intensifiée depuis les années 2010. Une équipe de chercheurs franco-brésilienne a démontré l'efficacité d'une algue brune pour ralentir la progression du Sars-CoV-2. D'autres scientifiques, de l'université de Cardiff (Royaume-Uni), développent un traitement par inhalation à base d'alginates – des dérivés des algues brunes – pour réduire la présence des bactéries dans les poumons des patients atteints de mucoviscidose. « *À l'Institut de la vision, à Paris, un patient a même recouvré partiellement la vue grâce à une thérapie génique utilisant une protéine d'algue photosensible : l'opsine* », rapporte le spécialiste.

Vincent Doumeizel, *La Révolution des algues*, Éditions des Équateurs, 2022 (et en BD, éd. Futuropolis, 2025)

Pourtant, les pays occidentaux accusent un retard considérable dans la production d'algues. L'Europe fournit moins de 1 % de l'offre mondiale. Avec près de 60 000 tonnes par an (tous types confondus), la France se hisse tout de même à la deuxième place des pays européens, derrière la Norvège. « *En France, on collecte principalement les algues brunes, laminaires notamment, dont on valorise certains polymères, les alginates* », indique Mélanie Cueff, responsable scientifique auprès de la Coalition mondiale des algues, chargée de développer une culture d'algues durable. Ces composés sont utilisés comme biostimulants agricoles, ou encore comme agents texturants dans les cosmétiques. Ils permettent même de produire des plastiques biodégradables, compostables et comestibles. Pour cela, on extrait les polymères des algues avant qu'elles ne se décomposent. Cette opération présente un avantage considérable par rapport au pétrole : elle n'est pas polluante – pour peu qu'on utilise

PHOTOPQR/SUD OUEST/MAXPPP

« ON IMAGINE QU'ELLES SONT IMMANGEABLES PARCE QU'ON A EN TÊTE L'IMAGE DE CELLES QUI SE DÉCOMPOSENT SUR LA PLAGE. MAIS C'EST COMPARER DES FRITES À DES POMMES DE TERRE POURRIES ! »

Vincent Doumeizel, conseiller Océan aux Nations unies

Algocultrice. Au Guilvinec (Finistère), Scarlette Le Corre exploite les algues depuis plus de trente ans : elle les récolte sur la plage et en pratique la culture sur des cordes en pleine mer.

MANUEL COHEN VIA AFP

des procédés enzymatiques – et permet de maintenir le carbone dans un cycle vivant.

Enfin, parmi les mille et un services rendus par les algues : leur pouvoir de séquestation du CO_2, encore discuté toutefois. Vincent Doumeizel pondère : *« Leur intérêt principal dans la décarbonation de l'économie réside plutôt dans leur capacité à remplacer les plastiques et fertilisants chimiques, à réduire les émissions de méthane, et à pouvoir être cultivées sans beaucoup d'énergie. »*

Aujourd'hui, le principal obstacle à l'essor de l'algoculture est la rareté de la ressource. *« Nous manquons de sites de production à grande échelle en Europe »*, explique le spécialiste. Les cultures françaises ne permettent de produire que 350 tonnes d'algues par an, le reste provenant de la cueillette. Sur le littoral, elles sont récoltées à la main ou par des machines à marée basse. En mer, à l'aide d'un crochet métallique – appelé « scoubidou » – suspendu à un bras hydraulique fixé à bord du bateau, ou encore d'un « peigne », sorte de long râteau. À l'inverse, 99 % de la production asiatique repose, elle, sur la culture. Il faut imaginer de grandes étendues de lignes fixées dans le sable, ou de radeaux accolés. Des branches ficelées entre elles forment un cadre dans lequel des câbles supportent les kilos d'algues rouges.

Première étape en France : 1000 tonnes cultivées en 2027

En France, le ministère de la Transition écologique a mis en place une feuille de route pour développer une filière algale robuste. Objectif : 1 000 tonnes d'algues cultivées en 2027, une première étape vers un développement à plus large échelle. Une perspective d'autant plus attrayante qu'elle offrirait emplois et revenus là où les ressources liées à la pêche diminuent. Et les algues ne manquent pas d'atouts écologiques : pas besoin de terres, d'engrais ni d'eau douce.

La réussite de l'algoculture française repose sur la capacité à ne pas réitérer les erreurs commises en agriculture. *« Le grand danger, c'est de cultiver de vastes surfaces en monoculture*, alerte Mélanie Cueff. *Car les algues entrent alors en compétition avec d'autres espèces pour les nutriments. »* La solution réside plutôt dans une forme de co-culture, par exemple en associant huîtres et algues. *« Les algues augmentent localement le pH de l'eau. Elles limitent ainsi les effets de l'acidification des océans et favorisent la fabrication de la coquille des huîtres*, ajoute la chercheuse. *En outre, elles attirent de nombreux micro-organismes qui renforcent l'immunité des mollusques. »* De tels parcs se développent en France, notamment dans la baie de Quiberon.

MARIE PARRA

La quatrième édition du festival Grand Océan, organisé notamment par Sciences et Avenir, se tiendra à Cherbourg du 26 au 28 septembre. Le thème ? Les abysses. L'occasion d'en parler ici… en profondeur.

EXPLORER LES ABYSSES

COURTESY TRITON SUBMARINES, OCEANX MEDIA

Dernière *terra incognita* de la planète, plus impénétrables qu'une forêt tropicale, les grandes profondeurs forment un monde à l'envers du monde connu, où croisent des espèces étranges qui ont dû s'adapter à des conditions insensées : noir absolu, pressions énormes, absence d'oxygène. Jusqu'à adopter des formes de vie si extrêmes qu'elles en ébahissent biologistes et chimistes…

L'exploration des fonds marins devient plus accessible grâce à des submersibles comme celui-ci, qui comporte une coupole en plexiglas offrant une vue panoramique.

JEUX DE LUMIÈRE EN EAUX PROFONDES

«S'allumer» comme une lampe-torche pour repérer ses proies ou les leurrer, se revêtir d'une cape d'invisibilité pour échapper à ses prédateurs… Dans les ténèbres absolues des abysses, le vivant a développé des stratégies ébouriffantes pour vivre et survivre !

Février 1977. Un petit sous-marin américain, l'*Alvin*, embarque une équipe de géologues au large des Galápagos pour observer la tectonique des plaques dans les fonds marins. À 2 500 mètres de profondeur, les chercheurs découvrent pour la première fois des sources hydrothermales, et avec elles une surprise de taille. Autour de ces cheminées géologiques, qui rejettent dans l'eau des fluides pauvres en oxygène, très acides et pouvant atteindre 400 °C, prolifèrent des bancs de moules jaunes, des palourdes blanches, des anémones, des poulpes, des crevettes, des vers tubicoles pouvant atteindre deux mètres de long, des crabes… Une oasis de vie là où on la pensait impossible, étant donné les conditions qui y règnent : obscurité totale rendant la photosynthèse impossible, température glaciale stagnant entre 0 et 4 °C, et pression pouvant atteindre jusqu'à 1 000 fois celles de la surface. Malgré ces conditions extrêmes, la vie y foisonne. Colorée et diversifiée ! Depuis, au fil d'expéditions menées dans les grandes profondeurs, le bestiaire de la vie abyssale n'a cessé de s'étoffer. Alors, comment toute cette faune peut-elle s'épanouir dans un milieu qui semble *a priori* si hostile ?

Jusqu'à 200 mètres de profondeur, l'environnement marin concentre la majeure partie de la vie océanique connue et décrite. Dans cette zone, dite photique, la lumière du soleil pénètre. Les organismes photosynthétiques qui s'en nourrissent fourmillent et, à leur suite, toute une faune variée : de l'oursin au requin en passant par les coraux, poissons et pieuvres. Au-delà de ce seuil, on entre dans un monde aphotique : la zone crépusculaire, d'abord, jusqu'à 1 000 mètres de profondeur, où règne une pénombre qui interdit la photosynthèse ; puis la zone de minuit, de 1 000 à 4 000 mètres de profondeur ; avant la zone abyssopélagique elle-même, qui va jusqu'à 6 000 mètres et où l'obscurité est… totale ? Pas exactement, car les organismes qui vivent dans ce milieu obscur produisent leur propre lumière : c'est la bioluminescence. *« Ce phénomène n'est pas l'apanage des organismes abyssaux,* note cependant Séverine Martini, océanographe au CNRS et à l'Institut méditerranéen d'océanologie, à Marseille. *Près de 75 % de tous les organismes marins de plus d'un centimètre seraient capables d'émettre de la bioluminescence. »* Présent à toutes les profondeurs, le phénomène apparaît cependant plus clairement dans ces zones obscures de l'océan, où il s'inscrit dans de surprenantes stratégies de chasse, de reproduction et de survie.

Au-delà de 200 mètres, et en l'absence de plantes, la chaîne alimentaire repose sur un autre socle : la neige marine. Une « pluie » de flocons blancs, dans laquelle *« on trouve tous les produits dérivés de la photosynthèse,* explique Jozée Sarrazin, chercheuse en écolo- ◆◆◆

Claire Nouvian, *Abysses*, Fayard, 2006

Sophie Gambardella, Pascale Ricard, Séverine Martini (dir.), *Profondeurs, les secrets des grands fonds marins*, CNRS Éditions), 2025

Fleur Daugey et Sande Thommen, *Abysses, exploration d'un nouveau monde*, Actes Sud jeunesse, 2024

Émission de radio
« La Vie dans les abysses », « La Tête au carré » (émission du 12 avril 2018), Mathieu Vidard, France Inter

Jozée Sarrazin, Stéphanie Brabant, Julie Terrazzoni, *Atlas des abysses*, Arthaud, 2024

MONTEREY BAY AQUARIUM

Le cténophore à ventre rouge (*Lampocteis cruentiventer*) se nourrit d'animaux bioluminescents. Étant translucide, il doit dissimuler son estomac pour éviter que son dernier repas ne l'illumine de l'intérieur, ce qui le ferait remarquer. Grâce à sa couleur rouge, quasiment invisible dans les profondeurs, il peut se cacher de ses prédateurs.

◆◆◆ gie benthique à l'Ifremer. *Des algues, du phytoplancton et du zooplancton qui, une fois morts, tombent vers les abysses ».* À cela s'ajoutent les déjections et restes d'animaux en décomposition *(lire p. 72-73),* l'ensemble formant un nuage diffus – et permanent – de particules carbonées suspendues entre deux eaux. Un véritable festin pour les petits poissons, crevettes, gastéropodes et autres vers.

Mais comment trouvent-ils leur chemin vers ces particules infimes ? En suivant la lumière, bien sûr ! *« Des bactéries bioluminescentes, par exemple, colonisent cette neige marine et, grâce à leur lumière, attirent ceux qui viennent s'en repaître,* explique Séverine Martini. *Elles profitent alors de la protection du système digestif de leur nouvel hôte pour proliférer avant d'être relarguées dans les selles. »* Le secret de ce balisage bioluminescent aux teintes turquoise ? L'oxydation d'une molécule, la luciférine, par une enzyme, la luciférase, au sein des bactéries.

Certains de ces micro-organismes ont mis cet atout à profit en développant une relation de symbiose avec d'autres espèces. Ainsi, la bactérie *Enterovibrio escacola* s'est confortablement installée dans le pédoncule frontal d'un poisson patibulaire devenu dans l'imaginaire collectif une icône des profondeurs océaniques : la baudroie abyssale (*Melanocetus johnsonii*). Vivant jusqu'à 1 500 mètres de profondeur, celle-ci se sert de cette « lanterne » comme d'un leurre pour attirer ses proies, qu'elle engloutit ensuite dans son immense mâchoire aux dents rétractables.

« Imaginez-vous plongé dans une pièce totalement obscure, propose Séverine Martini. *Une lumière qui s'allumerait soudain pourrait avoir sur vous divers effets : vous aveugler, vous faire fuir ou, au contraire, vous intriguer, et inviter à vous approcher. Dans tous les cas, elle véhiculerait une information. »* De la même manière, la bioluminescence est un outil de communication dont le dessein varie d'une espèce à l'autre – parfois au sein d'une même espèce. Ainsi, les femelles *Linophryne lucifer*, qui ressemblent à s'y méprendre aux baudroies abyssales, se servent également de leur lumignon pour attirer des partenaires sexuels. Les mâles, dix fois plus petits, peuvent ainsi les repérer dans l'immensité abyssale. Un sacré exploit… après lequel ils ne lâcheront plus prise ! En effet, ce « parasite sexuel » s'accroche à la femelle avec ses dents, finissant par « fusionner » avec elle jusqu'à sa mort, échangeant son sperme contre des nutriments.

La plupart du temps, les organismes bioluminescents émettent une lumière turquoise, entre le bleu et le vert, la zone du spectre lumineux que peuvent majoritairement percevoir les animaux à ces profondeurs. Mais un excentrique tire son épingle du jeu à contre-courant : le pois-

Le son du corb, le soir, au fond des eaux…

L'océan n'a rien d'un monde du silence. Dans la zone littorale, un micro pourra capter un crépitement, comme celui d'une poêle à frire sur feu vif ou d'une averse franche. C'est le concert des invertébrés : le claquement des grosses pinces d'une crevette, le craquement d'un oursin qui mastique, le grouillement des crabes sur les fonds rocheux… À la nuit tombée, en Méditerranée, monte le chant nuptial d'un poisson, le corb (*Sciaena umbra*) : un roulement de tambour très régulier. Et il n'est pas seul ! Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les poissons sont des animaux très volubiles, et leurs vocalisations représentent la plus grande part des sons captés par les éco-acousticiens. Mais *quid* des grandes profondeurs ? Dans l'eau, le son se propage quatre fois plus vite que dans l'air. La vastitude de l'océan résonne ainsi du chœur des cétacés, avec le chant lancinant des baleines à bosse et des baleines bleues, ou encore le caquètement pincé des orques. Le grand cachalot, capable de plonger à plus de 2000 mètres, émet quant à lui des séries de clics sonores pouvant atteindre 230 décibels – 100 de plus qu'un avion au décollage – qui lui permettent de communiquer et de se repérer. Le répertoire des cétacés ne cesse de surprendre. En 2024, des chercheurs américains parvenaient à identifier le rarissime rorqual tropical comme la source d'un son étrange – un grondement grave suivi d'une trille aiguë – enregistré dans les parages de la fosse des îles Mariannes dix ans plus tôt.

La galathée ou crabe yéti (*Kiwa hirsuta*) habite dans les abysses de l'océan Pacifique Sud. Il se nourrit de moules et de détritus, et probablement aussi des bactéries qui colonisent les nombreuses soies qu'il porte sur ses pattes.

FREMER

son-dragon du genre *Malacosteus*, qui vit aux alentours de 1 000 mètres de profondeur, diffuse une lueur… rouge ! Plus surprenant encore, il s'en sert pour mieux voir. Grâce à des photophores – des organes où se concentrent des cellules luminescentes, les photocytes – situés dans des replis sous ses yeux, il produit un faisceau « invisible » qui lui permet de repérer et chasser ses proies. À l'inverse, certains spécimens « éblouissent » leurs prédateurs le temps de filer en douce. Le vampire des abysses (*Vampyroteuthis infernalis*), un céphalopode d'une trentaine de centimètres vivant entre 600 et 1 000 mètres de profondeur, est lui aussi équipé de photophores, disposés le long de ses bras. Capable de moduler sa bioluminescence, cet animal peut émettre de rapides flashes lumineux pour aveugler et désorienter ses prédateurs, de la même façon que des céphalopodes plus proches de la surface, telle la seiche, se serviraient de leur encre pour distraire un ennemi et s'enfuir.

Dans les grands fonds, il y a toujours quelque chose à se mettre sous la dent…

Si l'on continue de descendre, pour atteindre 3 600 mètres de profondeur environ, on croisera la route de la hachette d'argent (*Argyropelecus hemigymnus*), de la famille des sternoptychidés, qui a développé une stratégie encore plus étonnante. Ce poisson passe ses journées bien à l'abri dans l'obscurité de la zone de minuit. Mais, sous le couvert de la nuit, il remonte vers la zone photique, où il se nourrit de crustacés minuscules, comme le krill. Lors de cette migration verticale, durant laquelle il risque d'être attaqué, il recourt à ce qu'on appelle la contre-illumination. Ses yeux captent l'intensité de la lumière qui vient de la surface, et les photophores qui tapissent son ventre s'y ajustent. Ainsi, pour les prédateurs qui nagent à un étage inférieur et scrutent la surface à sa recherche, il est virtuellement invisible !

À mesure qu'on s'éloigne de la surface, la neige marine se raréfie, à force d'être grignotée tout au long de sa descente. Dans les grands fonds, les organismes benthiques – qui vivent sur les sols marins – n'ont plus grand-chose à se mettre sous la dent. Et pourtant… La découverte de l'*Alvin* en 1977 a montré que la vie peut également foisonner dans ces plaines abyssales présumées désertes. *« Le secret de cette prolifération de vie est un procédé* ◆◆◆

FABIEN MICHENET / BIOSPHOTO

Poisson-pêcheur des abysses juvénile (*Gigantactis vanhoeffeni*). À l'âge adulte, il se développera au-dessus de ses yeux un leurre, organe de la forme d'une tige, bioluminescent, grâce auquel il attirera poissons et calmars. L'espèce prospère dans tous les océans du globe entre 300 et 5 300 mètres.

◆◆◆ *connu des biologistes depuis sa découverte en 1890 par le microbiologiste ukrainien Sergueï Vinogradski : la chimiosynthèse* », raconte Marie-Anne Cambon, microbiologiste à l'Ifremer. Ce mécanisme, d'abord observé dans des milieux sombres et pauvres en oxygène, comme des grottes et des sols sédimentaires, permet à certaines bactéries et archées d'utiliser des éléments qui sont d'ordinaire inexploitables, voire toxiques, pour la plus grande part du règne vivant. *« Au lieu de l'énergie solaire qu'utilisent, à la surface, les organismes photosynthétiques, bactéries et archées des profondeurs tricotent de la matière organique à partir de l'énergie chimique – sulfure d'hydrogène, fer, méthane, etc. – qu'ils tirent des fluides rejetés par les sources hydrothermales* », poursuit la chercheuse. Ils produisent ainsi les protéines, lipides et sucres dont ils ont besoin, ce qui fait d'eux la base alléchante d'une tout autre chaîne alimentaire. *« La chimiosynthèse permet d'entretenir une énorme biomasse à la biodiversité toutefois limitée, car l'environnement des sources hydrothermales est très contraignant »*, souligne Jozée Sarrazin. En effet, l'ambiance y est des plus hostiles : obscurité totale, présence de métaux lourds, températures pouvant atteindre 400 °C, radioactivité, forte acidité et pauvreté en oxygène.

Mais certaines créatures se maintiennent aux abords de ces structures géologiques en profitant de la matière organique produite par les micro-organismes chimiosynthétiques. *« Certains de ces animaux sont qualifiés d'espèces ingénieures, en raison de leur impact sur l'écosystème »*, poursuit la chercheuse. Parmi elles, dans le nord-est du Pacifique, les vers tubicoles géants (*Riftia pachyptila*) ont la particularité de vivre à l'intérieur de tubes qu'ils sécrètent, formant de larges colonies qui s'étendent sur plusieurs mètres carrés. En résulte une vaste « forêt » de tubes dans laquelle d'autres petits animaux, comme des gastéropodes ou des vers, peuvent s'abriter. Plus surprenant encore, *Riftia* est un exemple éloquent de symbiose totale et obligatoire. Si la larve de ce ver possède bien un système digestif, elle finit par le perdre lorsque le symbiote chimiosynthétique la colonise,

CHRISTOPHE PETIT-TESSON / CAPAPICTURES

« PRÈS DE 75 % DES ORGANISMES MARINS DE PLUS D'UN CENTIMÈTRE SERAIENT CAPABLES D'ÉMETTRE DE LA BIOLUMINESCENCE »

Séverine Martini, océanographe au CNRS et à l'Institut méditerranéen d'océanologie

engendrant une métamorphose durant laquelle l'anus et la bouche se ferment. À l'âge adulte, *Riftia* utilise ses branchies rouges et rétractiles pour capter les éléments chimiques dans l'eau, avant de les acheminer via son système sanguin vers un sac interne de bactéries chimiosynthétiques qui les exploitent pour produire la matière organique (sucres, lipides, protéines…) nécessaire à son alimentation.

Ces symbioses entre faune et micro-organismes se manifestent parfois de manière surprenante. Dans le sud de l'océan Pacifique, un drôle de crustacé rôde près des sources hydrothermales en secouant ses longues pinces velues. Celles-ci sont en effet couvertes de filaments – des soies –, desquels l'animal tient son nom : *Kiwa hirsuta*, ou crabe yéti. *« C'est un cas intéressant,* note Marie-Anne Cambon. *Le crabe "cultive" des bactéries sur ses soies en agitant ses pinces, le mouvement engendrant un meilleur accès de ses passagères aux éléments chimiques contenus dans l'eau qui l'entoure. Il peut ensuite brouter les tapis bactériens qui se sont ainsi développés sur lui. »*

Des mécanismes d'adaptation uniques qui alimentent la biodiversité

D'autres animaux profitent de la chimiosynthèse bactérienne sans en dépendre totalement. Les moules du genre *Bathymodiolus* sont équipées, sur leurs branchies, de véritables communautés de bactéries, où cohabitent plusieurs espèces. *« Certaines utilisent le sulfure, d'autres le méthane. On pense que cette diversité de métabolismes permet aux moules de composer avec les variations du milieu »*, note Marie-Anne Cambon. Mais ces moules ont aussi gardé leur capacité de filtration propre. De même pour la crevette *Rimicaris exoculata,* qui a la particularité d'héberger ses petits assistants microbiologiques dans son céphalothorax hypertrophié. Elle a quant à elle conservé son système digestif ouvert et fonctionnel. Si le rôle précis de ce dernier reste à élucider, des données publiées en 2022 suggèrent qu'il jouerait un rôle nutritif, détoxifiant et peut-être protecteur, en améliorant son système immunitaire.

Les chercheurs le reconnaissent : l'étendue réelle de la biodiversité abyssale nous échappe encore. Les grands fonds marins représentent 93 % du volume de la biosphère sur Terre, mais à ce jour, environ 25 % ont été cartographiés finement, contre moins de 1 % physiquement exploré *(lire p. 74-75)*. On a coutume de dire que l'on connaît mieux la surface de la Lune que le fond de nos océans, et c'est à juste titre… Ces environnements extrêmes sont peu aisés à atteindre, et les organismes qui y évoluent aussi surprenants que difficiles à observer *in situ*. Hélas, cette biodiversité, comme partout ailleurs, est en danger. Les fonds marins, pour leurs ressources en terres rares et autres minéraux, suscitent la convoitise de compagnies minières qui lorgnent du côté des nodules polymétalliques *(lire p. 76-79)* mais aussi des cheminées hydrothermales pour exploiter de potentiels minerais, mettant ainsi en danger des écosystèmes précieux. *« La biodiversité des grands fonds constitue pourtant une tout autre richesse, bien plus intéressante et durable,* alerte Jozée Sarrazin. *Dans les environnements extrêmes qui sont les leurs, l'évolution a pourvu ces organismes de mécanismes d'adaptation uniques. Des enzymes, par exemple, capables de fonctionner à haute pression, et à des températures extrêmes, ou encore des molécules aux propriétés antitumorales, découvertes chez certaines éponges. Il serait catastrophique de perdre toute cette diversité au profit de quelques minerais non renouvelables… »* **WILLIAM ROWE-PIRRA**

Vivre sans oxygène, c'est possible !

En 1977, des chercheurs faisaient une surprenante découverte dans les profondeurs du golfe du Mexique : des poches d'eau si salées (trois à huit fois plus que le reste de l'océan) et à la densité si élevée qu'elles ne se mélangent pas avec l'eau environnante, et sont totalement dépourvues d'oxygène. Si un animal décide d'y piquer une tête, le manque d'oxygène et le choc toxique dû à l'extrême salinité provoquent chez lui des lésions cérébrales causant rapidement sa mort. En témoigne la quantité de carcasses de poissons, gastéropodes et autres crabes que les chercheurs ont observée à la surface de ces étendues, que l'on a depuis repérées également en mer Méditerranée et en mer Rouge. Pourtant, ces lacs de saumure – dont la surface s'échelonne entre 1 mètre carré et 120 kilomètres carrés – ne sont pas déserts. Ils sont souvent associés à des suintements froids, des lieux similaires aux sources hydrothermales mais dont les fluides riches en sulfure d'hydrogène, méthane et autres hydrocarbures jaillissent à une température comprise entre 0 et 4 °C. Ces émanations sont propices aux bactéries chimiosynthétiques et à leurs symbiotes, comme les poissons de l'ordre des chimaéridés, ou encore les moules *Bathymodiolus,* qui tapissent les bordures des lacs de saumure. Plus surprenant encore, certains micro-organismes, comme les archées de l'ordre des halobactéries, raffolent des milieux très salins et prospèrent directement dans les poches d'eau sans oxygène.

Plongée dans les ténèbres

À conditions particulières, formes de vie singulières... et histoires extraordinaires ! De la vie dans les geysers à 350 °C à la mort de la baleine, un aperçu des conditions abyssales en trois tableaux.

Au cœur de l'enfer, les créatures de l'extrême

Pression écrasante, oxygène rare, obscurité totale, températures extrêmes, toxicité... Les dorsales océaniques, chaînes de montagnes sous-marines qui représentent plus de 75 % de l'activité volcanique de la Terre, abritent entre 500 et 5 000 mètres des milieux aux conditions dantesques : les sources hydrothermales. Dans ces endroits, l'eau froide des abysses (autour de 2°C) s'infiltre en profondeur dans les anfractuosités de la croûte océanique, avant de remonter chauffée par le magma, s'enrichissant au contact des roches en gaz (hydrogène sulfuré, méthane...), minéraux et métaux (fer, manganèse, zinc)... Elle ressort sous forme de panaches par des cheminées, les fumeurs. Les noirs, riches en sulfures, peuvent dépasser 350°C. Les blancs, moins chauds, contiennent calcium et silicium. Contre toute attente, ces geysers des mers sont colonisés par une faune foisonnante dont on connaît plusieurs centaines d'espèces. Rien qu'au nord-est de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, 74 ont été recensées en 2025, dont 29 endémiques, grâce à l'analyse de données recueillies en 2019 à bord du navire océanographique français l'*Atalante*. Premiers maillons de la chaîne trophique, bactéries et archées fabriquent de la matière organique à partir des composés chimiques présents dans les fluides. Vers et modioles *(au bord à dr.),* parentes des moules, s'en nourrissent. Ils attirent à leur tour crabes,

Pages réalisées par Laureen Bouyssou
Illustrations : Julie Terrazzoni

crevettes et poissons qui les mangent ainsi que les particules organiques qu'ils rejettent. Ainsi, sur la dorsale du Pacifique Est, les crabes *Bythograeidae* dévorent d'autres crustacés et la lycode hydrothermale (*Thermarces cerberus* ou anguille des sources, *en haut à dr.*) des amphipodes et des patelles. Dans la même zone, on croise également des clams *Calyptogena magnifica* (palourdes géantes, jusqu'à 26 cm) qui pompent le sulfure d'hydrogène avec leur pied à travers les crevasses de basalte au fond des océans, des colonies de vers géants blancs et rouges *Riftia pachyptila* (jusqu'à 2 mètres ! *à g.*), ou encore les petits vers de *Pompei Alvinella pompejana* (jusqu'à 15 cm) qui s'épanouissent à 40°C sous les pluies de particules sulfurées, vers 2 500 mètres...
À la même profondeur dans l'océan Indien, le gastéropode à pied écailleux (*Chrysomallon squamiferum*) ou « pangolin des mers » (environ 4 cm) est doté d'une coquille renforcée en sulfure de fer, exception du règne animal, qui le protège des prédateurs et fait office de bouclier thermique.
Quant aux crevettes *Rimicaris exoculata (à g.)*, dominantes sur la ride médio-atlantique, elles forment des essaims (jusqu'à 2 500 spécimens au mètre carré !) sur les parois des cheminées.
Difficiles d'accès, ces écosystèmes profonds s'étudient en observatoires de fond de mer à l'aide d'aspirateurs à faune ou d'analyseurs chimiques embarqués sur des sous-marins habités, ou de robots téléopérés. Plus de 600 champs hydrothermaux actifs ont déjà été identifiés. Mais on en découvre de nouveaux chaque année.

Vampyroteuthis infernalis
Céphalopode

Lieu de vie : eaux tropicales et tempérées
Profondeur : 600-900 m
Taille : ≤ 30 cm

Bathophilus flemingi
Stomiidae

Lieu de vie : Pacifique (de l'Alaska à la Californie)
Profondeur : d'environ 300 m à plus de 2 000 m
Taille : ≤ 16 cm

Enypniaste eximia
Échinoderme

Lieu de vie : Océan Indien / Atlantique Ouest / océan Austral
Profondeur : entre 400 et 5 700 m
Taille : de 6 à 25 cm

Les extraterrestres de l'océan profond

Encore largement méconnus, les abysses abritent d'étranges créatures. Certaines exécutent un ballet gracieux telle la méduse *Benthocodon pedunculata*, qui se déplace en contractant sa cloche arrondie, déployant autour d'elle ses tentacules vaporeux (environ 350 !). Avec son ombrelle translucide et sa teinte rougeâtre qui paraît noire dans les profondeurs, elle passe inaperçue. Ovni marin, le concombre de mer *Enypniaste* a des allures de poulet sans tête. Son corps rose et gélatineux (qui vire au brun-rouge à l'âge adulte) laisse entrevoir son intestin enroulé et rempli de sédiments qu'il aspire avec ses tentacules buccaux, se nourrissant des nutriments qu'ils contiennent. Rassasié, il expulse une crotte de sédiments « nettoyés », contribuant ainsi à purifier et aérer les fonds marins, puis s'élève dans l'eau grâce à ses « voiles » palmées. Au contact d'un prédateur, sa peau collante s'illumine et se détache, adhère à celui-ci, le rendant vulnérable ! D'aspect rétrofuturiste avec ses branches à sphères translucides, l'éponge lampadaire (*Chondrocladia lampadiglobus*)… ne brille pas, mais cette carnivore capture des crustacés avec ses crochets auto-agrippants. Amusant, le calamar porcelet (*Helicocranchia pfefferi*) a un corps oblong, un siphon en forme de groin pour se déplacer, une petite queue frétillante et des tentacules qui forment

Benthocodon pedunculata
Cnidaire

Lieu de vie : Pacifique et Atlantique
Profondeur : Jusqu'à 4 000 m
Taille : ≤ 3 cm

Praya dubia
Cnidaire

Lieu de vie : Atlantique / Pacifique / océan Indien
Profondeur : de 700 à 1 000 m
Taille : ≤ 50 m

Chondrocladia lampadiglobus
Éponge

Lieu de vie : Pacifique Est
Profondeur : de 2 600 à 3 000 m
Taille : 50 cm

Helicocranchia pfefferi
Céphalopode

Lieu de vie : Pacifique / Atlantique Nord
Profondeur : Autour de 1 000-2 000 m (pour les spécimens adultes)
Taille : ≤ 10 cm

une touffe sur la tête. Quant au vampire des abysses (*Vampyroteuthis infernalis*), ses huit bras hérissés d'épines (cirres) sont reliés par une membrane qui évoque des ailes de chauve-souris. Contrairement aux autres céphalopodes qui se nourrissent de proies vivantes, il avale zooplancton et diatomées morts, mues de crustacés et fèces présents dans la neige marine qu'il « ratisse » à l'aide de ses deux longs filaments rétractables. Le mucus secrété par ses ventouses agglomère ensuite le tout, qu'il dévore. S'il se sent menacé, il retourne sa membrane, exhibant ses épines ! Organisme marin le plus long après le ver lacet (*Lineus longissimus*), le siphonophore géant (*Praya dubia*) peut dépasser 40 mètres, soit plus que la taille d'une baleine bleue. Dotée de cloches natatoires (nectophores) pour se propulser, cette guirlande mortelle de la largeur d'un manche à balai est dotée de centaines de fins tentacules venimeux dont la piqûre paralyse plancton, petits crustacés et poissons appâtés par la lueur bleue qu'elle émet. Prédateur tout aussi redoutable, le poisson-dragon (*Bathophilus flemingi*) aux dents effilées et transparentes attire ses proies avec son barbillon bioluminescent. En 2022, au large de la Californie, des scientifiques de l'Institut de recherche de l'aquarium de la baie de Monterey (MBARI) ont observé un spécimen pour la quatrième fois en trente ans…

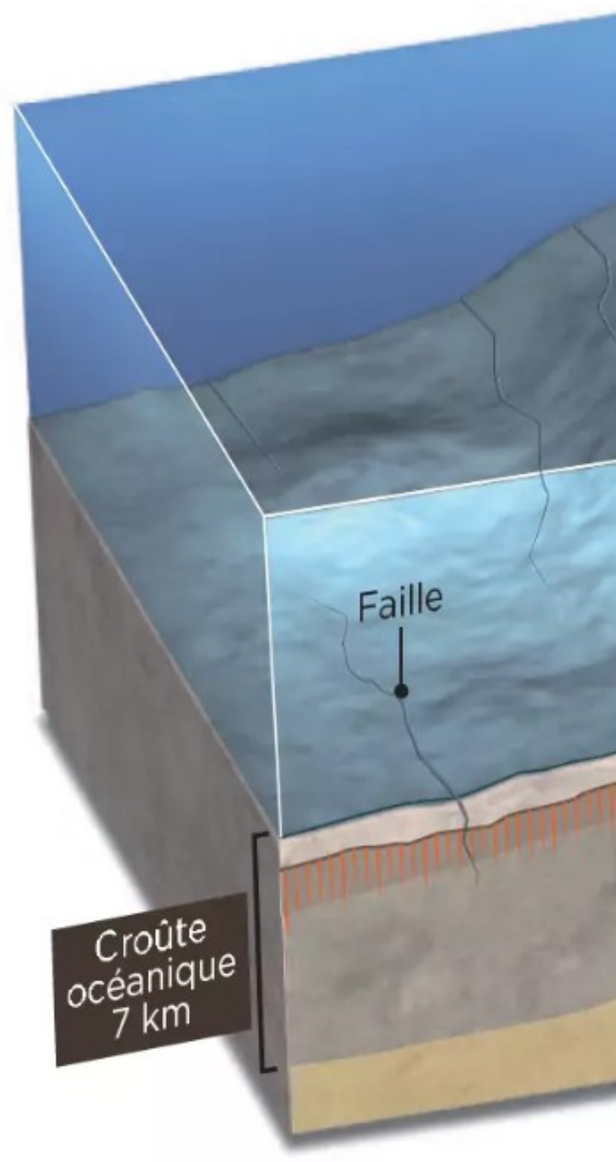
Près de la baleine morte, le grand ballet des charognards

Les baleines constituent une impressionnante source de vie. De leur vivant, car leurs excréments favorisent la croissance du phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire. Mais aussi après leur mort ! Car ces gigantesques cétacés – dont la baleine bleue est le plus gros représentant – pèsent jusqu'à 130 tonnes, avec une couche de graisse de 15 à 20 centimètres entre la peau et les muscles. De quoi fournir une nourriture abondante, d'autant plus convoitée qu'elle est rare dans les abysses.

En grande majorité (90% des cas), une fois mortes, les baleines s'enfoncent dans les profondeurs, les 10 % restantes se décomposant à la surface ou s'échouant. Généralement, elles sont encore à peu près intactes lorsqu'elles touchent le fond. Durant quelques mois voire un an ou plus, des charognards dits « mobiles » se régalent des tissus mous (graisse, muscles et organes internes) : des myxines, poissons anguilliformes *(au-dessus de la queue)*, des poissons queues-de-rat et surtout des requins-dormeurs *(en haut à g.)* qui arrachent de gros morceaux de chair en y plantant leurs dents acérées. Puis – et cela peut durer plusieurs années –, d'autres espèces nécrophages s'attaquent aux sédiments enrichis en matières organiques qui entourent la baleine morte, ainsi qu'aux os : petits

gastéropodes, concombres de mer, mais aussi polychètes (ou vers annélides). Parmi eux, les *osedax (touffes rouges sur la carcasse)*, des « mangeurs d'os » de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres qui vivent dans tous les océans jusqu'à une profondeur d'environ 4 000 mètres. Dotés de branchies (leurs panaches rouges), ces vers n'ont ni bouche, ni estomac, ni anus. Ils se nourrissent en perforant les os grâce à des bactéries symbiotiques qui dégradent les molécules complexes (collagène et lipides) qu'ils contiennent. Ce faisant, ils créent des cavités dans le squelette, accélérant sa destruction et offrant des habitats à d'autres espèces attirées par le tapis bactérien qui le recouvre : moules, palourdes, crustacés, étoiles et escargots de mer… Cette phase bactérienne peut prendre cinquante ans… voire un siècle ! À ce stade, un squelette peut héberger une macro-faune d'une densité dépassant les 20 000 individus au mètre carré ! Lorsque les os ne contiennent plus d'éléments nutritifs, des organismes filtreurs (anémones) peuvent ensuite les coloniser. Au final, une carcasse de baleine nourrirait ainsi plus de 400 espèces animales. Si certaines se rencontrent également autour des sources hydrothermales et des suintements froids, une vingtaine au moins ne s'observe nulle part ailleurs…

Le plancher océanique révèle ses secrets de fabrication



Observé à la fois de la Terre, avec des robots sous-marins, et du ciel avec des satellites d'une puissance inédite, le fond des océans, situé à plusieurs kilomètres sous la surface des eaux, se dévoile peu à peu. Dans ses formes comme dans sa formation.

En mai 2018, une crise sismique sans précédent secoue Mayotte, île de l'océan Indien située dans l'archipel des Comores. Elle va durer plusieurs mois. Un an plus tard, la campagne en mer Mayobs1 identifie le responsable : un volcan à l'activité frénétique – jusqu'à 400 mètres cubes de lave par seconde – qui vient de naître à 50 kilomètres de l'île, par 3500 mètres de fond. Suite à cette découverte, la mission scientifique Sismaoré révèle l'existence d'un corridor de centaines de volcans sous-marins, de 600 kilomètres de long sur 200 kilomètres de large, qui pourrait avoir un lien avec l'émergence de l'archipel. Les grands fonds marins sont-ils donc loin d'avoir révélé tous leurs secrets ?

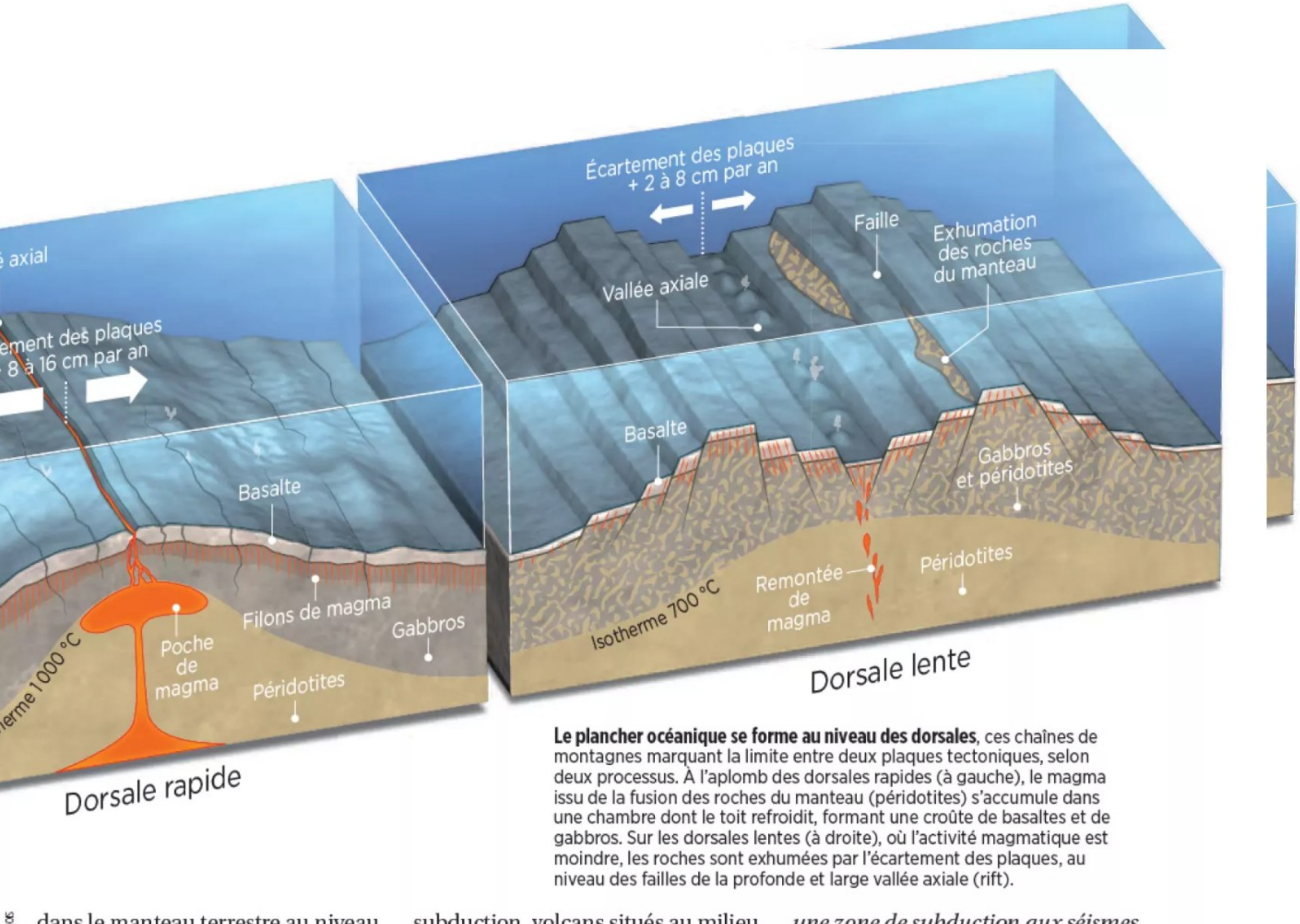
Environ un quart seulement d'entre eux a été cartographié aujourd'hui. C'est que, situés en moyenne à 3 700 mètres de profondeur, ils ne se laissent pas observer facilement : à 1000 mètres, la nuit est totale. Mais *« il est plus important de comprendre les processus de formation du plancher océanique que de vouloir tout cartographier au centimètre près »*, tempère Mathilde Cannat, directrice de recherche CNRS émérite à l'IPGP (Institut de physique du globe de Paris). Notamment parce que la topographie des grands fonds, révélée par les campagnes océanographiques, est à la fois bien plus coûteuse à étudier et beaucoup plus simple que celle des continents. Elle se compose principalement de trois grandes zones : les marges continentales, les plaines abyssales sises à plus de 3500 mètres et souvent hérissées de volcans plus ou moins enfouis sous des sédiments, et les dorsales, immenses chaînes volcaniques qui serpentent sur plus de 60 000 kilomètres au milieu des océans. La croûte océanique qui tapisse aujourd'hui les fonds est relativement jeune : elle ne dépasse pas les 200 millions d'années, quand celle des continents atteint les 4 milliards.

Comment ce plancher se forme-t-il ? En 1973, des géologues embarqués à bord de l'*Archimède*, un submersible français, observèrent que des roches volcaniques provenant du manteau – couche comprise entre la croûte et le noyau – se déversent le long de la dorsale médio-atlantique. Cette découverte confirmait l'hypothèse de la tectonique des plaques. Selon cette théorie, la lithosphère, enveloppe rigide de la Terre comprenant la croûte et la partie supérieure du manteau, forme des plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres en se rapprochant ou en s'écartant. Au niveau des dorsales océaniques, deux plaques s'écartent. Cela provoque des failles – dans lesquelles s'infiltre l'eau de mer – et une remontée de magma. Ainsi se forme un nouveau plancher océanique, et parfois des volcans. À mesure que le plancher s'éloigne de la dorsale, il se refroidit, s'alourdit et s'enfonce, avant de finir par plonger

SOURADEEP MAHATO

« IL EST PLUS IMPORTANT DE COMPRENDRE LE PROCESSUS DE FORMATION DU PLANCHER OCÉANIQUE QUE DE VOULOIR TOUT CARTOGRAPHIER AU CENTIMÈTRE PRÈS »

Mathilde Cannat, Institut de physique du globe de Paris



Le plancher océanique se forme au niveau des dorsales, ces chaînes de montagnes marquant la limite entre deux plaques tectoniques, selon deux processus. À l'aplomb des dorsales rapides (à gauche), le magma issu de la fusion des roches du manteau (péridotites) s'accumule dans une chambre dont le toit refroidit, formant une croûte de basaltes et de gabbros. Sur les dorsales lentes (à droite), où l'activité magmatique est moindre, les roches sont exhumées par l'écartement des plaques, au niveau des failles de la profonde et large vallée axiale (rift).

BRUNO BOURGEOIS

dans le manteau terrestre au niveau des fosses de subduction, que l'on trouve principalement sur le pourtour des vieux océans, notamment du Pacifique. Les grands fonds marins se renouvellent donc en permanence, ce qui explique leur « jeunesse ». En 1977, une découverte majeure a bouleversé ce qu'on en connaissait, celle d'une source hydrothermale – geyser d'eau de mer – près de la dorsale Est-Pacifique au large des Galápagos, à 2500 mètres de profondeur. Depuis, plus de 200 sites hydrothermaux ont été identifiés sur les dorsales océaniques.

Des milliers de petits monts et de volcans sous-marins

La majorité des données sur la topographie des fonds (75 %) provient de l'altimétrie par satellite. Lancé en 2022 conjointement par la Nasa et le Cnes (Centre national d'études spatiales), le satellite Swot, d'une résolution de 8 kilomètres, a révélé l'existence de milliers de petits monts et volcans sous-marins et permis d'affiner la connaissance des marges continentales. Mais, pour étudier les processus à l'œuvre au niveau des zones géologiquement actives – dorsales, subduction, volcans situés au milieu des plaques –, on utilise des sondeurs acoustiques multifaisceaux offrant une meilleure précision : de 20 à 30 mètres s'ils sont embarqués sur des bateaux, ce qui permet par exemple, de repérer des coulées volcaniques ; jusqu'au mètre s'ils sont fixés sur des robots submersibles. *« Les zones cartographiées par ces robots, qui peuvent descendre jusqu'à 6 000 mètres, sont ridiculement petites – quelques dizaines de kilomètres carrés – par rapport à la taille des océans. Cette précision est néanmoins indispensable pour analyser les processus magmatiques, tectoniques ou hydrothermaux »*, observe Mathilde Cannat. Depuis une quinzaine d'années, ont même été installés des observatoires sous-marins dotés d'instruments destinés à étudier la sismicité, la température, la chimie des fluides et la faune. *« L'un d'entre eux, européen, a été placé sur le site hydrothermal Lucky Strike au large des Açores (dorsale Atlantique). Deux autres sont situés sur la dorsale Juan de Fuca dans le Pacifique : l'un, américain, sur le volcan Axial, au large de l'Oregon ; l'autre, canadien, proche de Vancouver, surveille aussi une zone de subduction aux séismes potentiellement dévastateurs »*, précise Mathilde Cannat.

L'archipel des Comores, issu de l'éloignement de deux plaques

La multiplication des moyens d'observation a mis en évidence la présence de larges failles au niveau des dorsales lentes, qui ne s'écartent que de quelques centimètres par an quand les rapides peuvent dépasser les 15 centimètres. Cela a révélé l'existence d'un second processus de formation du plancher océanique. Le premier, déjà connu, provoque des coulées de laves basaltiques. Le deuxième fait remonter des roches froides provenant du manteau de la Terre, les péridotites, par les larges failles des dorsales lentes. Conséquence, on observe là des concentrations élevées d'hydrogène et de méthane. Enfin, aux Comores, l'observation du corridor de volcans et des failles a remis en question une idée préconçue : la formation de l'archipel serait due à une fragilité de la croûte marquant l'éloignement de deux plaques et non, comme on l'a longtemps cru, à une remontée de magma au milieu d'une plaque. **MARIE-LAURE THÉODULE**

AU FOND DES MERS, DES NODULES QUI VALENT DE L'OR

Catastrophe pour la biodiversité ? Opportunité unique de collecter aisément des matériaux stratégiques pour une énergie propre ? Entre les partisans d'une extraction immédiate des nodules gisant dans les abysses et ceux qui estiment urgent d'attendre, la bataille fait rage.

C'est un trésor fabuleux accumulé depuis des millions d'années au fond des océans. D'abondantes concrétions minérales, formées pour l'essentiel de fer et de manganèse. Mais qui affichent aussi des teneurs alléchantes en matériaux stratégiques (cuivre, nickel, titane, cobalt, etc.) et en métaux nobles comme l'or, le platine, le palladium ou l'argent. Et enfin contiennent des terres rares, ces substances abondantes mais particulièrement difficiles à extraire, car présentes en très faibles concentrations, et essentielles pour la défense, l'électronique, l'éclairage, les véhicules électriques et les éoliennes.

Selon une estimation publiée en 2022 par des chercheurs du Service géologique des États-Unis (USGS), les océans abriteraient au moins 1 140 milliards de tonnes de minéraux. Prenons l'exemple du cuivre, dont les besoins s'envolent avec la multiplication des usages de l'électricité. Nous en consommons une vingtaine de millions de tonnes par an. Sur la terre ferme, les réserves récupérables sont estimées à environ 870 millions de tonnes. Selon l'USGS, il y en aurait deux fois plus dans les océans !

« Dans une mine de cuivre comme celles du Chili, il faut extraire 50 millions de tonnes de roches stériles pour accéder aux 20 millions de tonnes d'un minerai qui contient moins de 0,5 % de cuivre, soit 100 000 tonnes, explique James Hein, coauteur de la publication de 2022. *Il faut aussi créer des routes, amener l'électricité et l'eau, et raffiner le minerai aussi près que possible du lieu d'extraction pour éviter son transport. »* Rien de tel au fond des océans, où l'on pourrait presque dire qu'il n'y a qu'à se baisser pour ramasser un mélange de métaux quasi pur. *« On peut ensuite se rendre n'importe où dans le monde pour en extraire les éléments voulus, pour un coût modique »,* complète le spécialiste. Comment un tel « miracle » est-il possible ?

L'eau de mer contient une multitude d'éléments minéraux dissous. Sur le plancher océanique, quand le substrat est solide, ils se déposent lentement, à raison de quelques millimètres d'épaisseur par million d'années. Sur les pentes

CESSE/DAILYMOTION

« ON CONNAÎT MAL LA NATURE DES GISEMENTS, ET LES ÉVALUATIONS DE RENTABILITÉ SE FONT AU DOIGT MOUILLÉ »

Cyrille P. Coutansais, directeur du département Recherches du Centre d'études stratégiques de la Marine

des monts sous-marins, cela forme des croûtes métalliques. Dans les plaines abyssales, au-delà de 4 000 mètres de fond, le sol est souvent sédimentaire. *« Le dépôt se fait alors sur la moindre aspérité, par exemple sur un petit gravier ou une dent de requin »*, explique la géologue Mathilde Cannat, spécialiste de géosciences marines à l'Institut de physique du globe de Paris. Les minéraux prennent l'aspect de patates métalliques de quelques centimètres. Ce sont ces deux types de ressources, croûtes et nodules, qui ont été évalués par les géologues.

SPECIMEN: VIDEO COURTESY OF THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY AND NOAA OCEAN EXPLORATION; IMAGE COURTESY OF THE NOAA OFFICE OF OCEAN EXPLORATION AND RESEARCH, 2019 SOUTHEASTERN U.S. DEEP-SEA EXPLORATION NODULE

Certains robots cueillent les nodules un à un, d'autres ratissent les fonds

Mais il en existe un troisième, dont le processus de formation est bien différent. Dans les régions hydrothermales actives, sur l'axe des dorsales océaniques, de l'eau de mer s'infiltre dans la roche volcanique sous le plancher océanique. Elle s'y réchauffe et dissout les minéraux de ce matériau, avant de ressortir en créant des cheminées minérales et sulfurées, les fameux fumeurs noirs, sièges d'une biodiversité foisonnante. *« Ce sont des zones de petite dimension, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de longueur,* précise Mathilde Cannat. *Quand leur activité cesse, on ne sait plus les détecter. On ne sait pas non plus comment leurs minéraux évoluent, car ils sont altérés par des réactions chimiques avec l'eau de mer. »* Les fumeurs éteints seront donc difficiles à recenser et à exploiter.

En attendant, les appétits se focalisent sur les nodules – les plus faciles à collecter, avec des robots sous-marins qui les cueillent un à un ou ratissent les fonds – et sur les croûtes. Pour être récupérées, celles-ci doivent d'abord être fracturées. C'est ce qu'entend faire la Norvège, qui espère accorder rapidement des licences pour l'exploitation de croûtes dans ses eaux, sur une surface de 280 000 kilomètres carrés, la moitié de celle de la France ! Le projet est pour l'instant suspendu en raison de l'opposition du parlement. Rappelons que tout pays côtier bénéficie d'un droit exclusif sur les ressources marines jusqu'à 200 milles marins (370 kilomètres) de son rivage, ce que l'on appelle la zone économique exclusive (ZEE).

Une opposition que l'on retrouve chez bon nombre de scientifiques, en particulier ceux qui étudient le fond des océans. Car ◆◆◆

Reposant à une profondeur de 4 000 à 6 000 mètres, les nodules polymétalliques sont constitués de manganèse, nickel, cobalt, cuivre... dont les nouvelles technologies sont friandes.

Un spécimen récolté par le Service géologique des États-Unis.

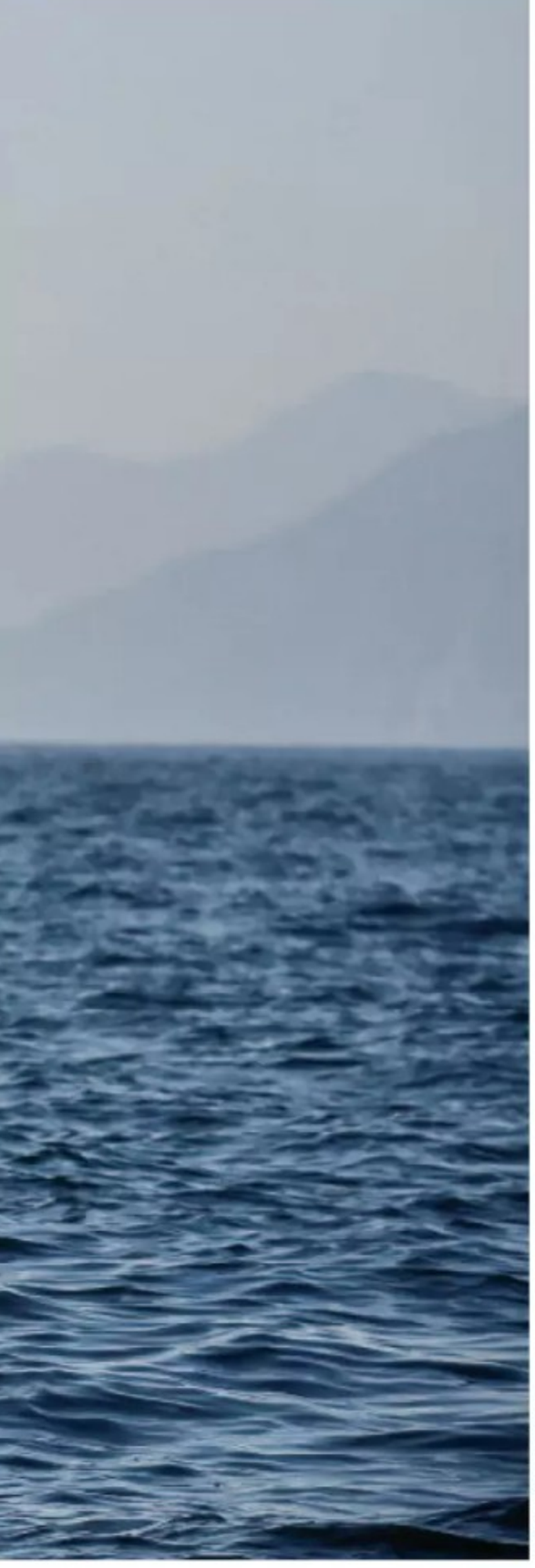
◆◆◆ l'exploitation des minéraux ne s'y fera pas sans dommages. *« Le premier problème, c'est que la faune, et en particulier la macrofaune, vit fixée sur des surfaces dures, que ce soient des nodules ou des encroûtements »*, s'inquiète Mathilde Cannat. Une biodiversité abyssale encore mal connue : la zone de fracture géologique de Clarion-Clipperton (CCZ), au beau milieu du Pacifique Est, abriterait plus de 6 000 espèces, dont seulement 438 ont été assez documentées pour se voir attribuer un nom scientifique. *« Comme l'exploitation obligerait à ratisser des surfaces considérables, on dépeuplerait ces lieux de manière irrémédiable. Dans les régions où les premiers échantillons ont été collectés dans les années 1970, la vie n'est pratiquement pas revenue, car les processus biologiques sont très lents en raison d'une température proche de zéro et de la rareté des nutriments. »* Face à ce risque, la firme américaine Impossible Metals, qui espère exploiter une concession dans la CCZ, met en avant sa technologie censée prélever les nodules un à un. Elle affirme être en mesure d'éviter ceux qui hébergent un organisme fixé, grâce à des caméras et à une intelligence artificielle. Auditionné par une commission du Congrès américain le 29 avril dernier, le patron de l'entreprise a expliqué qu'il ne collectera que 40 % des nodules *« pour préserver la biodiversité »*. L'autre crainte concerne les sédiments soulevés par l'exploitation minière. *« On ne pourra rien extraire sans générer des panaches qui se diffuseront jusqu'à la surface,* explique Mathilde Cannat. *Cela risque d'affecter toutes sortes d'espèces, notamment celles qui dépendent de la lumière, mais aussi celles qui recourent à la bioluminescence. Même si l'on définit des zones tampons, sans extraction, ces panaches se déplaceront sous l'effet des courants. Cela risque de déséquilibrer la pompe biologique du carbone dans les océans. »* Un dérèglement qui aurait un effet inévitable sur le climat puisque ce cycle biologique, qui repose sur l'ensemble des écosystèmes océaniques, capte 30 % du carbone émis dans l'atmosphère par les activités humaines et le séquestre durablement au fond des océans.

Le risque d'un profond bouleversement ne fait cependant pas l'unanimité parmi les scientifiques. Lui aussi auditionné au Congrès américain, Thomas Peacock, qui étudie les panaches de sédiments sous-marins au Massachusetts Institute of Technology (MIT), a expliqué que deux campagnes d'observations menées en 2021 et 2022 dans la zone de Clarion-Clipperton

Des militants de Greenpeace « accueillent » le navire d'exploitation minière *Hidden Gem*, propriété de la société canadienne The Metals Company, à son retour de huit semaines de prospection dans la zone Clarion-Clipperton (située entre Hawaï et le Mexique), en novembre 2022. La signature d'un Code minier international qui réglementerait cette activité se fait encore attendre.

Cyrille P. Coutansais et Guillemette Crozet, *La Mer, une infographie*, CNRS Éditions, 2023

« Les minerais sous-marins : protéger les écosystèmes, exploiter les ressources », revue *Responsabilité et Environnement*, Annales des Mines, 2017



REUTERS/GUSTAVO GRAF

ont montré que seuls les cinq premiers centimètres de sédiments sont soulevés pendant la collecte de nodules, soit trois à six fois moins que prévu : *« Au lieu de former un panache, 92 à 98 % des sédiments se déposent dans un rayon de 90 mètres autour du lieu d'exploitation ou restent en suspension à moins de 60 centimètres du fond. »* Le reste flotte entre 2 et 4,50 mètres du plancher océanique, et pas au-delà. *« Les courants océaniques emportent ces sédiments en dehors du site minier, mais à des concentrations de quelques milligrammes par litre. »* Prudent, Thomas Peacock a néanmoins défendu un développement par étapes. *« Il s'agit de comprendre à quelle échelle l'exploitation minière dans des zones particulières pourrait être écologiquement viable. »*

Face aux critiques, les partisans de l'exploitation sous-marine affirment qu'elle aurait bien moins d'impact que les mines continentales sur la biodiversité, le climat, et les humains. C'est le cas de Scott Vincent, un investisseur. *« L'exploitation minière terrestre tue et rend malades de nombreux êtres humains chaque année et contribue aux émissions de CO_2. La récolte de nodules crée un monde plus sûr. »*

Donald Trump a signé le 24 avril un décret qui autorise l'administration américaine à délivrer des permis d'exploitation. Il concerne aussi bien les eaux sous juridiction américaine que les ressources en haute mer, qui sont en principe sous l'autorité de l'ONU. En effet, la Convention du droit de la mer, adoptée par 151 États en 1982, considère que les minéraux situés dans les eaux internationales font partie du patrimoine de l'humanité. Un texte que les États-Unis n'ont jamais signé… Cette convention a créé l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM). Basé à Kingston (Jamaïque), cet organisme multilatéral est chargé d'encadrer l'exploration dans les eaux internationales, ce qu'il a fait. En revanche, malgré onze ans d'efforts, il n'a pas réussi à adopter un code minier pour organiser l'exploitation des minéraux, suivre ses impacts, et reverser une partie des richesses engendrées aux pays qui n'ont pas accès à cette ressource.

« La situation est très compliquée à l'AIFM car beaucoup de nations sont favorables à l'exploitation, quand d'autres préconisent de faire une pause », explique Cyrille P. Coutansais, directeur du département Recherches du Centre d'études stratégiques de la Marine.

« DANS LES RÉGIONS OÙ LES PREMIERS ÉCHANTILLONS ONT ÉTÉ COLLECTÉS DANS LES ANNÉES 1970, LA VIE N'EST PRATIQUEMENT PAS REVENUE »

Mathilde Cannat, géologue

Un moratoire défendu par 37 pays – riches ou émergents – à ce jour, dont la France, qui prône quant à elle une interdiction pure et simple.

La réaction à l'annonce du décret de Donald Trump n'a pas tardé. Cinq jours plus tard, la firme canadienne The Metals Company (TMC), qui défendait jusque-là un projet en haute mer dans le cadre onusien, a retourné sa veste. Elle a soumis aux États-Unis une demande d'exploitation d'une concession située dans la CCZ.

Comme pour le pétrole et le gaz, bien des forages s'avèrent finalement décevants

Un autre sujet suscite bien des inquiétudes : en haute mer, comment vérifier que les opérateurs respectent les règles ? *« La meilleure assurance contre les pollutions minières, c'est l'existence d'une société civile,* répond Mathilde Cannat. *Mais il n'y en a pas dans les océans. Cette exploitation se ferait donc à l'abri des regards. »* Aujourd'hui, une dizaine de start-up espèrent plonger leurs robots miniers dans les abysses. Elles ont levé des fonds importants – TMC a déjà englouti 500 millions de dollars dans son projet. Mais au-delà des formidables promesses faites par ces entreprises à leurs investisseurs, une fois l'exploitation engagée, celle-ci peut-elle s'avérer rentable ? *« Probablement,* avance James Hein. *Mais cela dépendra aussi des éléments que l'on vise. Par exemple, les nodules de la CCZ contiennent très peu de terres rares, qui seront donc chères à extraire. Dans l'ouest du Pacifique, en revanche, les nodules en contiennent dix fois plus. »* De son côté, Scott Vincent se veut optimiste : *« Les données économiques des projets dans lesquels j'ai investi sont très attractives. »*

« On peut penser qu'il sera plus facile d'exploiter les gisements des ZEE, estime Cyrille P. Coutansais. *Plus vous êtes loin en mer, plus la logistique est onéreuse. On connaît mal la nature exacte des gisements, et les évaluations de rentabilité se font un peu au doigt mouillé. On sait qu'il y a des ressources, mais les données sont parcellaires puisqu'il est très difficile d'étudier les fonds marins. Prenons l'exemple du pétrole et du gaz : bien des forages s'avèrent finalement décevants. C'est sans doute parce que la rentabilité de l'exploitation sous-marine est très incertaine que les géants de l'industrie minière n'y sont pas très favorables. »*

DENIS DELBECQ

La chasse aux trésors sous-marins, une affaire d'État

C'est le moins accessible, et le plus fascinant, des terrains de fouille : l'océan recèle des millions d'épaves, témoins d'histoires oubliées. Pour l'explorer, la France est au premier rang… depuis soixante ans.

C'est sans doute la plus vaste réserve de trésors au monde. Plus de 3 millions d'épaves, selon l'Unesco, reposeraient sur les fonds sous-marins, dont 120 000 à 200 000 dans les eaux françaises. Trières grecques, boutres arabes, langskips (drakkars) vikings, jonques chinoises, galions espagnols, flûtes néerlandaises, porte-avions japonais… Chaque époque a vu les navires et cargaisons coulés attirer les pillards et chasseurs de trésors. Mais ce n'est qu'au début du XXe siècle, avec les travaux du Français Alfred Merlin, que la valeur de ces vestiges comme témoignage historique sera reconnue. Aidé de pêcheurs d'éponges grecs employés comme scaphandriers, ce directeur du service des antiquités de Tunisie explore entre 1907 et 1913 un navire du Ier siècle avant notre ère repéré au large de Mahdia (Tunisie). Sculptures en marbre et en bronze, éléments architecturaux… la qualité des pièces qu'il remonte convainc les savants de l'énorme potentiel des abysses. Sans pour autant les décider à affronter eux-mêmes les périls d'une expédition sous-marine.

La mise au point, en 1943, du scaphandre autonome par Jacques-Yves Cousteau et Émile Gagnan va changer la donne. Cependant, la fouille du site antique du Grand Congloué, réalisée entre 1952 et 1957 au large de Marseille, s'achève sur un bilan mitigé : réussite technologique, échec scientifique. En effet, l'équipe animée par Cousteau est incapable de comprendre qu'elle explore non pas une, mais deux épaves d'époques différentes, coulées au même endroit. La mésaventure servira de leçon. Dans le Drassm (Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) qu'André Malraux crée en 1966, à Marseille, au sein du ministère de la Culture, les plongeurs seront tous des archéologues. *« Premier du genre dans le monde, ce département a été conçu comme un service national en charge de la gestion administrative et scientifique du patrimoine immergé. Et non comme un laboratoire attaché à un musée »*, explique Michel L'Hour, directeur du Drassm de 2006 à 2021.

La tâche confiée à ce département est ambitieuse. En effet, sa compétence est étendue aux 11 millions de kilomètres carrés de la zone économique exclusive (ZEE) française, Outre-mer compris. Or, ses archéologues ne disposeront longtemps que d'un seul navire, l'*Archéonaute*, pour mener à bien leur mission de recensement, de protection, d'étude et de valorisation des vestiges sous-marins. Ils vont d'abord se concentrer sur des vaisseaux antiques en Méditerranée. Puis intervenir, après les années 1980, dans l'Atlantique et la Manche. Faisant bondir le nombre d'épaves connues et inventoriées de 49 en 1966 à plus de 6 000 en 2025. Navires, sous-marins, aéronefs – dont le P38 Lightning d'Antoine de Saint-Exupéry –, restes de constructions, traces d'occupation ancienne : les vestiges inventoriés sont de nature

Humanoïde. En 2022, au large de Bastia, le robot Ocean One K a exploré, à 500 mètres de profondeur, l'épave du paquebot *Francesco Crispi,* coulé en 1943.

STÉPHANE CAVILLON-DRASSM

« NOS NAVIRES DE RECHERCHE PEUVENT ÉVALUER LE MATÉRIEL ARCHÉOLOGIQUE AVANT L'INTERVENTION D'OPÉRATEURS DE CÂBLES OU DE FERMES ÉOLIENNES »

Arnaud Schaumasse, directeur du Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (Drassm)

FRÉDÉRIC OSADA/IMAGES EXPLORATIONS

diverse et peuvent avoir été repérés aussi bien en mer que sur le littoral, cachés sous le sable ou dissimulés dans des cavités ennoyées, telles les peintures rupestres de la grotte Cosquer, près de Marseille, mises au jour dans les années 1990. En tout, 1 600 sites ont été expertisés ou étudiés en près d'un demi-siècle.

Mais le monde change. La généralisation de la plongée sportive et le développement de la pêche au chalut viennent peu à peu menacer les épaves jusqu'à grande profondeur. Longtemps considérées comme inaccessibles, ces dernières connaissent désormais le risque d'être pillées ou détruites avant même qu'on ait pu les enregistrer. Ce constat va pousser le Drassm à se pourvoir d'une instrumentation adaptée. Car les robots opérés par les industriels et la Marine nationale n'ont pas été conçus pour manipuler un fragile matériel archéologique. En 2007, la *Lune,* un vaisseau de Louis XIV coulé par 90 mètres de fond au large de Toulon, est utilisée comme « chantier laboratoire » pour accueillir les essais des prototypes créés par les – rares – équipes spécialisées du monde entier. Plusieurs machines y sont testées, dont Ocean One K, l'étonnant robot humanoïde du Stanford Robotics Lab (Californie), qui parviendra en 2022 à atteindre les 850 mètres de profondeur au large de Cannes.

La mission au cap Corse : https://sciav.fr/ArchéoCorse

Le Drassm va alors s'équiper d'une flottille de robots dont certains, comme le ROV Arthur, sont conçus pour travailler à une profondeur pouvant atteindre 2 500 mètres. Il se dote aussi de deux navires de recherche pour les diriger : l'*André Malraux*, en 2012, l'*Alfred Merlin*, en 2021. *« Ces bâtiments peuvent évaluer le matériel archéologique présent en amont de l'intervention d'aménageurs offshore : opérateurs de câbles ou gestionnaires de fermes éoliennes,* explique Arnaud Schaumasse, l'actuel directeur du Drassm. *Pour l'*Alfred Merlin*, s'ajoute la possibilité de mettre en œuvre le ROV Arthur en eaux profondes et de traverser l'Atlantique pour aller travailler, par exemple, aux Antilles ».* L'arrivée de ce robot a considérablement facilité le travail de l'équipe. En juillet 2023, par 350 mètres de fond au large du cap Corse, il est parvenu à remonter d'une épave romaine une série d'objets exceptionnels : lingots de verre, pièces de vaisselle, bassin en bronze et amphore en terre cuite.

Un leadership de plus en plus contesté à l'étranger

Toute cette activité a contribué au rayonnement international du Drassm, qui incarne presque à lui seul l'archéologie sous-marine française et dont on a souvent sollicité l'expertise à l'étranger : dans le lac Michigan (États-Unis), à l'occasion de la recherche du *Griffon*, le navire de l'explorateur français Cavelier de La Salle (1643-1687) ; au sultanat de Brunei, lorsqu'il a dirigé l'équipe internationale impliquée dans la fouille, à 60 mètres de profondeur, d'un bateau asiatique du XV^e^ siècle, dont le chargement comprenait pas moins de 4 600 pièces de porcelaine de l'époque Ming ; à Vanikoro, dans le Pacifique Sud, pour les besoins de deux expéditions parties sur les traces de Lapérouse (1741-1788), qui ont abouti à l'identification des épaves de *La Boussole* et de *L'Astrolabe.* Quelques exemples parmi d'autres…

Un remarquable bilan, sur lequel les archéologues français auraient tout intérêt à ne pas se reposer, estime Michel L'Hour. *« Nombre de pays sont décidés à rattraper leur retard sur la France, qui perd peu à peu son rôle de leader. Certains l'ont déjà largement dépassée en termes de moyens logistiques et humains. La Chine, bien sûr, mais également la Corée du Sud, dont le service d'archéologie sous-marine compte, pour un nombre bien moins important d'épaves, des effectifs deux fois supérieurs à ceux du Drassm. »* Ce dernier ne repose toujours que sur une quarantaine de personnes, dont une douzaine d'archéologues…

VAHÉ TER MINASSIAN

Interview

Paul Watson

Militant écologiste, fondateur de l'ONG Sea Shepherd Conservation Society

« L'écologie consiste à protéger l'humanité de sa propre folie »

LÉA CRESPI POUR SCIENCES ET AVENIR

Il faut bannir la géo-ingénierie et décréter un moratoire de 75 ans sur la pêche commerciale, plaide cet infatigable défenseur de la biodiversité.

Quel est l'état du vivant dans l'océan ?
Nous sommes confrontés à un véritable effondrement. Depuis 1950, la population de phytoplancton a baissé de 40 %. Or il est à la base de la chaîne alimentaire marine, tout en fournissant une large part de l'oxygène que nous respirons et en capturant d'énormes quantités de CO_2. Pourquoi cette raréfaction ? Parce que les activités humaines engendrent une diminution des populations de baleines, de dauphins, de tortues et d'oiseaux de mer qui apportent, via leurs déjections, les nutriments nécessaires à sa prolifération : magnésium, fer et azote. La baleine bleue rejette chaque jour près de trois tonnes d'excréments ! Il existe un équilibre écologique délicat entre les espèces animales et les plantes aquatiques, et il a été profondément perturbé.

Depuis le moratoire de 1986, qui interdit la chasse à la baleine, comment les populations de ces espèces de cétacés ont-elles évolué ?
Malheureusement, ce moratoire, promulgué par la Commission baleinière internationale, n'est que théorique. Depuis 1986, environ 40 000 baleines ont été tuées, principalement par le Japon, la Norvège et l'Islande… en violation flagrante de la loi. En 2014, la Cour internationale de justice a ordonné l'arrêt de la chasse organisée par les Japonais en Antarctique, ce qui ne les a pas empêchés de continuer. S'ils ont émis contre moi un mandat d'arrêt, c'est notamment parce que j'ai révélé la vérité sur leurs agissements, et que leur gouvernement veut se venger.

Ce n'est probablement pas la seule menace qui pèse sur l'océan…
Il faut citer l'exploitation minière des grands fonds, les pollutions plastiques, chimiques et radioactives, auxquelles s'ajoutent la surpêche et le braconnage. D'après les chercheurs canadiens Daniel Pauly *(lire l'interview p. 57)* et Boris Worm, d'ici à 2048, il n'y aura plus d'industrie de la pêche, car il n'y aura tout simplement plus de poissons. Lors de la COP 21, en 2015, j'avais déjà déclaré que nous aurions besoin d'un moratoire d'au moins soixante-quinze ans sur la pêche commerciale pour permettre à l'océan de réparer les dommages que nous lui avons causés.

Quelles sont les solutions pour éviter un scénario catastrophe ? On entend parler de la géo-ingénierie marine, qui consiste à modifier la composition chimique et biologique des océans pour capturer davantage de CO_2…
J'ai pu arrêter deux projets de ce type au large des Galápagos et des îles de la Reine-Charlotte (Canada). Jeter de la limaille de fer dans l'océan pour stimuler le phytoplancton sans réaliser d'étude environnementale complète au préalable, c'est une idée complètement dingue. Il n'y a aucune preuve que cela fonctionne. Et qu'en est-il du magnésium, de l'azote et des autres éléments vitaux dont regorge l'océan ? Pour assurer la protection de la biodiversité et du climat, des solutions existent. Nous devons mettre fin à notre dépendance à l'égard des énergies fossiles, adopter un régime alimentaire à base de végétaux, accorder à l'océan soixante-quinze ans de répit, mettre en place de larges campagnes de plantation d'arbres, cesser la production de plastique à usage unique…

Comment rester optimiste face à l'ampleur de la tâche à accomplir ?
Je ne suis absolument pas inquiet pour l'avenir de l'océan, car la Terre se portera très bien dans 200 millions d'années. Ce sera une planète magnifique… et sans humains. L'écologie consiste donc à protéger l'humanité de sa propre folie. Je crois les nouvelles générations beaucoup plus conscientes, motivées et investies pour leur planète. Et je ne doute pas qu'elles prendront les choses en main.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARIE PARRA

Radical. Organisateur d'actions coup de poing contre les navires de pêche, notamment baleiniers, Paul Watson s'est retrouvé en conflit avec plusieurs pays, dont le Japon. Poursuivi par cet État, il a été détenu pendant cinq mois et libéré en décembre 2024.

Paul Watson, *Urgence ! Il faut sauver les océans*, Glénat, 2020

RÊVER
À NOUVEAU
C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année plus de 40 000 jeunes[1] en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2024. Agence Marcel - © Yann Le Pape

CCF
BANQUE

LES MEILLEURS PRODUITS D'INVESTISSEMENT

sélectionnés pour vous

Au Crédit Commercial de France, notre indépendance nous permet de sélectionner pour vous **les meilleurs partenaires parmi les plus grandes institutions financières** telles que Eurazeo, HSBC Asset Management, Morgan Stanley, Pictet Asset Management et Rothschild & Co Asset Management.*

Rendez-vous dès maintenant **en agence** ou sur **ccf.fr**

CCF | BANQUE PATRIMONIALE DEPUIS 1917

*CCF n'a pas de lien capitalistique avec une société de gestion appartenant au même groupe financier. CCF entretient des liens économiques avec les partenaires sélectionnés. CCF - S.A. au capital de 147000001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315769257 - Siège social: 103 rue de Grenelle - 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'ORIAS sous le numéro 07030182 (www.orias.fr).